



UNIVERSIDAD DE MALAGA

DEPARTAMENTO DE EXPRESION GRÁFICA, DISEÑO Y PROYECTOS EN LA INGENIERÍA.

LA MÁQUINA EN SUS COMIENZOS. DISEÑO DE UN MODELO VIRTUAL SEMEJANTE Y FUNCIONAL.

TESIS DOCTORAL, presentada por Don Antonio López López para la obtención del título de Doctor.

DIRECTORES:

Doctor Don Pedro Portillo Franquelo,
Catedrático de Universidad de Expresión Gráfica
en la Universidad de Málaga.

Doctor Don Siro Villas Tinoco, Profesor Titular
de Universidad de Historia Contemporánea en la
Universidad de Málaga.

Málaga, enero del 2000.

LA MAQUINA EN SUS COMIENZOS.
DISEÑO DE UN MODELO VIRTUAL
SEMEJANTE Y FUNCIONAL.

SUMARIO.

- I.- AUTORIZACIONES.
- II.- AGRADECIMIENTOS.
- III.- INDICE.
- IV.- DESARROLLO.
 - IV - 1.- Introducción.
 - IV - 2.- Breve reseña histórica.
 - IV - 3.- Estudio de las máquinas escogidas.
 - IV - 4.- Conclusión.
 - IV - 5.- Fuentes y Bibliografía.

PEDRO PORTILLO FRANQUELO, CATEDRÁTICO DE
UNIVERSIDAD DE EXPRESIÓN GRÁFICA EN LA
INGENIERÍA Y DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO DE
EXPRESIÓN GRÁFICA, DISEÑO Y PROYECTO EN LA
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

INFORMA: que ha codirigido la Tesis Doctoral titulada "La
máquina en sus comienzos. Diseño de un modelo virtual
semejante y funcional", realizada por D. Antonio López
López y, como prescribe el reglamento vigente de la
Universidad de Málaga, una vez finalizada la investigación

AUTORIZA la presentación de la referida tesis, por considerar
que reúne todos los requisitos formales y científicos para
optar el interesado a la obtención del título de Doctor.

Y para que así conste y surta los efectos oportunos, firma el
presente informe en Málaga, a treinta de noviembre de mil
novecientos noventa y nueve.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a horizontal oval frame. The signature is stylized and appears to read 'P. Portillo'.



SIRO VILLAS TINOCO, PROFESOR TITULAR DE UNIVERSIDAD DE HISTORIA MODERNA, EN EL DEPARTAMENTO DE HISTORIA MODERNA Y CONTEMPORÁNEA EN LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS DE LA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA:

INFORMA

Que ha codirigido con el Dr. D. Pedro Portillo Franquelo la Tesis Doctoral titulada “La Máquina en sus comienzos. Diseño de un modelo virtual semejante y funcional”, realizada por el Licenciado D. ANTONIO López López y, como prescribe el Reglamento vigente de la Universidad de Málaga, una vez finalizada la investigación

AUTORIZA

la presentación de la referida Tesis, por considerar que reúne todos los requisitos científicos y formales para optar el interesado al Título de Doctor.

Y para que así conste y surta los efectos oportunos, firmo el presente Informe en Málaga a día 30 de noviembre de 1999

Fdo: Dr. Siro Villas Tinoco.
Profesor Titular de Historia Moderna

II.- AGRADECIMIENTOS.-

Tarea difícil es la de poder agradecer como se merecen a todos los que con el consejo acertado, la frase de ánimo, la aportación documental, la experiencia o la paciencia, han contribuido a que este trabajo llegue a materializarse y consiguiera la autorización de sus directores, para ser presentado como válido al Tribunal que lo habrá de confirmar.

En primer lugar, mi agradecimiento va dirigido a todos los compañeros del Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos en la Ingeniería, que con dedicación, amabilidad y cierta dosis de paciencia, han aportado sus conocimientos y experiencias, ayudándome a conseguir con rapidez lo que sin su ayuda hubiera representado un largo proceso. Deseo resaltar la ayuda prestada por los profesores Rafael Platero y Oscar de Cózar que además dedicaron una buena parte del tiempo que requerían sus objetivos, en materializar ciertos procesos que el trabajo precisaba y que disminuye-

ron, de una forma importante, el tiempo que necesariamente hubieran empleado en desarrollarlos.

En segundo lugar a los compañeros de la Escuela Universitaria Politécnica y de la profesión, y a los amigos cuyas palabras de ánimo y de elogios me sirvieron de apoyo moral en todo momento, e incluso me aportaron ideas válidas para mejorar algunas formas de planteamiento de los problemas que el tema del trabajo presentaba. Varias de ellas fueron motivo de acertadas modificaciones que bien merecieron el tiempo nuevamente empleado para corregirlas.

Al Profesor Doctor D. Siro Villas Tinoco, antiguo compañero y colaborador en la empresa privada que amablemente y con dedicación sin límites, se ofreció a codirigir este trabajo desde su faceta de historiador. Siempre admiré su entrega y eficacia en el trabajo que le ha llevado a las altas cotas del saber que ocupa actualmente, siendo esta dedicación y afición al trabajo bien realizado, un ejemplo a seguir que me ha estimulado en la reali-

zación de la tarea que ahora ha culminado. Gracias D. Siro por esa inestimable ayuda prestada que ojalá alguna vez pudiera compensar, aunque solo fuere en una pequeña parte.

Al Doctor D. Pedro Portillo Franquelo, Profesor de Profesores, superior amable y a la vez exigente que desde que tuve la gran suerte de que me ofreciera dar clases de Oficina Técnica, me ha trazado el camino seguro y eficaz para la mejor realización del trabajo y para la consecución de unas mejores cotas de servicio en la enseñanza. También es un modelo a seguir pero imposible de pretender igualar, aunque intentarlo produce cierta sinergia, y ayuda a la consecución de mejores fines. Su respaldo desde el principio de dedicarme a la enseñanza, el que me ha ofrecido durante el tiempo de realización de este trabajo que ahora culmina y el que sin duda recibiré en ocasiones posteriores, solo podrán tener mi mas ferviente agradecimiento, pues difícilmente podré compensarlos en la forma que se merecen.

Y por último a mi familia de la que también he recibido frases de aliento, el ofrecimiento de su ayuda y el saber soportar pacientemente todos estos años de estudio intensivo, y sobre todos Loli, mi mujer, a la que dediqué menos atención de la que se merece. A todos ellos le dedico este trabajo, y si consigo el fin propuesto, también les ofreceré por su ayuda la consecución de este último grado académico.

A mi familia.

LA MAQUINA EN SUS COMIENZOS. DISEÑO DE
UN MODELO VIRTUAL SEMEJANTE Y
FUNCIONAL.

INDICE.

1.- INTRODUCCIÓN.-

2.1.- LA PREHISTORIA.

2.2.- EL NEOLÍTICO Y LA EDAD ANTIGUA.

2.2.1.- La Agricultura.

2.2.2.- La Energía.

2.2.3.- La minería.

2.2.4.- Los transportes.

2.2.5.- El Textil.

2.2.6.- Los metales.

2.2.7.- La medida del tiempo.

2.2.8.- La industria.

2.3.- LA EDAD MEDIA.

2.3.1.- La Agricultura.

2.3.2.- La Energía.

2.3.3.- Los transportes.

2.3.4.- El Textil.

2.3.5.- La metalurgia.

2.3.6.- La medida del tiempo.

2.3.7.- La industria.

2.3.8.- La Imprenta.

2.4.- LA EDAD MODERNA.

2.4.1.- Leonardo da Vinci.

2.4.2.- La energía.

2.4.3.- La Minería.

2.4.4.- Los transportes.

2.4.5.- El Textil.

2.4.6.- La Metalurgia.

2.4.7.- La medida del Tiempo.

2.4.8.- La Imprenta.

2.4.9.- Los mecanismos.

2.5.- LA EDAD CONTEMPORÁNEA.

3.1.--LA SIERRA HIDRAULICA.

3.1.1.-Antecedentes históricos.

3.1.2.- Análisis del funcionamiento.

3.1.3.- Deficiencias observadas y soluciones propuestas.

3.1.4.- Verificación de las deficiencias del dibujo original.

3.1.4.1.- Desvío entre la ballesta y la pieza.

3.1.4.2.- Desplazamiento transversal de la sierra.

3.1.5.- Descripción del mecanismo propuesto.

3.1.6.- Diseño de los componentes de las máquinas.-

3.1.6.1.- Barras del conjunto deformable.

3.1.6.2.- Radios y rueda de avance de la pieza.

3.1.6.3.- Dimensiones de la rueda de avance de la pieza.

3.1.6.4.- Ballesta y sierra.

3.1.6.5.- Ejes de sierra y de unión de barras.

3.1.6.6.- Eje de ruedas.

3.1.6.7.- Bancada.

3.1.7.- Piezas de las máquinas en tres dimensiones.

3.1.7.1.- Barras fijas y móviles.

3.1.7.2.- Eje motor con radios.

3.1.7.3.- Ejes de barras, de ballesta y de sierra.

3.1.7.4.- Ballesta y sierra.

3.1.7.5.- Visión de conjunto de la Sierra hidráulica.

3.2.- BOMBA HIDRÁULICA DOBLE PARA MINA.-

3.2.1.- Antecedentes históricos.-

3.2.2.- Análisis del funcionamiento.-

3.2.3.- Deficiencias observadas y soluciones propuestas.

3.2.4.- Verificación de las deficiencias del dibujo original.-

3.2.4.1.- Desplazamiento en pieza -U-, por gancho -Q-.

3.2.4.2.- Desvío de pieza -U- sin desplazamiento de -I-.

3.2.5.- Descripción del mecanismo propuesto.-

3.2.6.- Diseño de los componentes de las máquinas.

3.2.6.1.- Diámetro y dientes de rueda motriz y piñón.

3.2.6.2.- Pie de bomba y pistón.

3.2.6.3.- Disposición de tuberías y depósitos.

3.2.6.4.- Dimensiones y pesos de vástagos de máquinas y piezas -U-

3.2.6.5- Uniones de manivelas, bielas y vástagos.-

3.2.6.6.- Bancada.

3.2.6.7.- Ejes y soportes.

3.2.7.- Agua elevada por las bombas y potencia absorbida.

3.2.8.- - Piezas de la máquina en tres dimensiones.-

3.2.8.1.- Rueda y piñón.

3.2.8.2.- Pie de bomba y pistones.

3.2.8.3.- Piezas -U- y ganchos de madera.

3.2.8.4.- Bulones tipo de unión de vástagos y piezas -U-.

3.2.8.5.- Bancada.

3.2.8.6.- Ejes, soportes y rueda hidráulica.

3.2.8.7.- Conjunto de bomba hidráulica.

IV.- DESARROLLO.

1.- INTRODUCCIÓN.-

La historia de los procesos de mecanización se ha iniciado con un cierto retraso con respecto a otras ciencias sociales, posiblemente debido a la lentitud con la que se producían los acontecimientos, y a la menor difusión que de ellos se hacía por la dificultad de comunicación existente.

Las causas que principalmente debieron de influir en este retraso histórico podrían ser que el principal objetivo que se fijaban los diseñadores y usuarios era obtener de los mecanismos la máxima utilidad y el mejor rendimiento, por lo que no pensaban en darlos a conocer. Los constructores, que eran los propios artesanos generalmente poco eruditos, no tendrían posibilidad de acceder a los centros del saber, únicos con medios para proceder a la divulgación de las ideas.

Y si a lo anterior se une que las máquinas de uso civil eran elementos con poca influencia en el acontecimiento histórico que desde el punto de vista propagandístico no representaban políticamente ningún valor para el que mandaba, tampoco tenía gran sentido darles publicidad.

La historia de la Tecnología, describiendo sus formas y usos y exponiendo sus influencias en el desarrollo del ser humano, ha sido tratada extensamente y de forma magistral, a partir del segundo tercio del siglo actual. Una pequeña parte de la numerosa bibliografía existente se cita en el apartado correspondiente de este trabajo.

La historia comenta lo extremadamente lentos que fueron los primeros pasos dados por el homo sapiens en el uso de las herramientas. Se tardaron muchos siglos, desde su aparición hasta el Neolítico, para que surgieran útiles realmente novedosos. A partir de la Edad Media el tiempo empleado en la obtención de nuevos mecanismos se fue acelerando, de una forma inmensamente mas activa que en las épocas anteriores, hasta alcanzar con la Revolución Industrial cotas impensadas.

En las épocas anteriores a la Edad Antigua, los útiles tenían como único fin lograr más facilidad y eficacia en los procesos fabriles comunes, sin aspirar a conseguir otros nuevos. Por ello solo se producían pequeñas mejoras que hacían variar levemente sus formas.

A partir del bronce, junto con la mejora de los útiles aparecen algunos mecanismos que eran movidos por la fuerza procedente del agua, de la sangre y en muy menor grado del viento. Según Julio Caro Baroja, del siglo III al I antes de Cristo aparecieron gran número de inventos¹ y de procesos productivos.

Posteriormente, en la Edad Media, la idea mecanicista se hace mas patente y universal. En esta fractura cronológica, aparecieron mas innovaciones de máquinas que relatos y dibujos conocidos hay. Durante los siglos que comprende ese periodo

¹ CARO BAROJA, J. *Tecnología popular española*, pág. 82.

histórico, también se crearon las universidades y se incrementó la difusión de la cultura entre los núcleos del saber.

La invención de la imprenta permitió la divulgación de los acontecimientos de todo tipo, entre ellos los tecnológicos, que pudieron ser conocidos por mayor número de expertos.

Dado que la idea de la invención seguía en aumento, aún a pesar de lo empobrecida que, según determinada historiografía, fue ese periodo histórico, surgieron representaciones de un buen número de máquinas, algunas de ellas irrealizables, bien por poco útiles o por falta de materiales y medios adecuados para la fabricación. Pero aquellas otras que demostraron su eficacia, fue posible dar a conocer su finalidad y utilidad, incluso su apariencia, a un mayor número de artesanos que podían construirlas en sus lugares de origen, posiblemente variando formas y materiales pero con los mismos resultados satisfactorios.

El incremento habido en la aparición de nuevos mecanismos y su utilización en distantes y diferentes lugares en un relativo corto espacio de tiempo, se debió fundamentalmente a la imprenta que hizo posible la divulgación más generalizada sin necesidad de desplazarse hasta la ubicación del modelo.

La invención de nuevas máquinas se mantuvo, con oscilaciones mas o menos importantes, hasta el siglo XVIII en el que la evolución fue espectacular. Al final del siglo XX se ha podido comprobar que lo que consideramos un aumento grandioso de las invenciones en los siglos XVIII y XIX, ha quedado empe-

queñecido comparado con el habido en éste. Y sin duda el siglo XXI superará al actual.

Desde un punto de vista general, la inmensa mayoría de los nuevos mecanismos son modificaciones, perfeccionamientos y mejoras de los ya existentes y solo unos pocos de ellos son verdaderas invenciones novedosas que vienen a cubrir un espacio anteriormente no utilizado.

Hasta el siglo XVII fueron los resultados prácticos los que comprobaron lo irrealizable de algunos mecanismos. Posteriormente, la aplicación de los conocimientos teóricos a la mecanización hizo que las invenciones utópicas fueran cada vez menos representadas, ya que previamente podía afirmarse su inutilidad. Los que no eran posible de construir por causa de carencias técnicas, no eran necesariamente desechados sino que se perfeccionaban hasta conseguir los fines propuestos.

Desde muy pronto la mecanización ha sido un deseo y una necesidad de la humanidad, aunque no la haya dado a conocer como hizo con las otras artes. La escultura, la pintura, la arquitectura y las letras, han formado parte del Arte en su acepción culta. La mecanización, sin embargo, ha sido obra del pueblo que la usaba para trabajar, lo que hasta épocas recientes era considerado labor de las clases humildes, no apropiada a la aristocracia.

Según los tratados antropológicos, la industrialización universal es atribuible a diversas razones, unas inducidas por

las otras. Así, la mayor demanda de productos provocada por el aumento de población a su vez originada por la mejora en la alimentación y en la sanidad, precisaba de más materia prima y productos terminados. Las naciones más poderosas que incrementaban sus territorios por la fuerza, requerían armamento para la lucha y medios con los que transportar los ejércitos. El comercio que se hacía más universal, demandaba sistemas de transporte adecuados a sus necesidades. Las vías de comunicación, la agricultura y todos los procesos productivos que intervenían en la vida cotidiana, reclamaban mejoras que beneficiaran sus objetivos. Esta sucesión de necesidades y demandas combinadas motivó la aceleración en la obtención de nuevos mecanismos que posibilitaran satisfacerlas.

La tecnología según George Basalla "en sus comienzos atendió a una necesidad del hombre"², y le ayudó a que progresara, mejorando sus condiciones de vida y permitiéndole convivir con sus vecinos sin la lucha continua por la subsistencia, ya que era posible obtener alimentos para todos con relativa facilidad. Las herramientas sirven al hombre como ayuda de las manos y para prolongar sus brazos; a su vez los mecanismos lo suplen en el trabajo, desarrollando, bajo su vigilancia, las labores repetitivas y que precisan de gran esfuerzo físico, además de poderlas realizar durante más tiempo.

La influencia de la Tecnología sobre la Sociedad y la Economía ha sido analizada por múltiples investigadores, encon-

² BASALLA, G. *La evolución de la tecnología*, Prólogo.

trando una estrecha relación entre ella y el progreso de los pueblos. Según Kahn, L.A.White afirma que:

"Los sistemas sociales son una función de los sistemas tecnológicos, mientras que la ideología, se ve fuertemente condicionada por la tecnología³."

Y añade:

"No hay un progreso de las ciencias sincronizado con la pobreza⁴."

Desde antiguo las obras y pertrechos de guerra han aportado ideas para la mejora de los mecanismos usados en épocas de paz. La primera rueda representada, figura 2.2.5, es un carro de guerra. Las poleas se representan en las fortalezas. Los tornos son usados para tensar las ballestas. Los barcos fueron mejorados con las defensas, los explosivos se usaron para la construcción, y las armas ayudaron a perfeccionar los útiles empleados en el trabajo diario.

C. Cipolla comenta que Europa dominó el comercio a escala mundial, por su superioridad técnica en el arte de la guerra, y sometió con un puñado de hombres el poder azteca y J. Stradamus opina que a Europa le dio primacía mundial la maestría para fabricar cañones, barcos, molinos, imprentas, etc.

En relación con la importancia del conocimiento de la historia, en todas las ramas del saber, T.S. Eliot menciona en su obra un ilustrativo suplemento del Cristian News-Letter, del 24/7/1946, realizado por Marjorie Reeves, en el cual refiriendo-

³ KAHN, J.S. *El concepto de cultura. Textos fundamentales*, introducción, pág. 23.

⁴ WHITE, L. A. *El concepto de cultura* (1959), pág. 131.

se a "La cultura de una industria", escribe entre otras opiniones la siguiente respecto a lo que habría de enseñarse a un joven trabajador:

"... incluye la geografía de las materias primas, y de los mercados a que se destina el producto final, la evolución histórica, las invenciones y antecedentes científicos, la economía, etc."⁵

¿No sería esto aplicable a un joven ingeniero o a un estudiante de ingeniería? Saber tecnología también es conocer las máquinas, su aspecto real y su evolución. Y si ésta se deriva de un estudio personal, aún se conocerá más a fondo el pensamiento de los antiguos constructores de máquinas y sus usuarios.

El Doctor F. Giménez Yanguas en su conferencia pronunciada con motivo del X Congreso Internacional de INGENiería GRAFica en Málaga, se refirió a la necesidad del conocimiento de la Historia de la Ingeniería por los profesionales, diciendo:

"Esta disciplina que no se encuentra demasiado desarrollada, pero que al igual que ya ocurre en otras ramas del saber: Derecho, Medicina, Farmacia, Economía, etc., está llamada a tener su propio desenvolvimiento, y presenta entre sus objetivos indagar y estudiar todos los antecedentes tecnológicos y su evolución en el tiempo; lo que en el terreno de la ingeniería ofrece un claro interés, no solo para que el ingeniero disponga de una panorámica más amplia de su propia especialidad, sino por la proyección de futuro que tal visión le suministra".⁶

Y abundando en esta idea G.F.W. Hauck, piensa que:

⁵ ELIOT, T.S. *Notas para la definición de la cultura*, introducción, pág. 17.

⁶ GIMÉNEZ YANGUAS, F. *Estructuras y conexiones interdisciplinares de la ingeniería gráfica*, pág. 7.

"los ingenieros que ignoran el pasado, poco pueden hacer por el futuro"⁷,

expresión similar a las utilizadas en otras ramas del saber que tiene también su aplicación en la ingeniería, siendo el conocimiento histórico de los mecanismos una necesidad profesional.

En el capítulo 2 de este trabajo se describe, de forma resumida, una pequeña parte de la Historia de la Tecnología, referida a los mecanismos más conocidos, mostrándose en ella las diferentes fases por las que ha discurrido la mecanización universal, mecanización que, con importantes desfases en el tiempo, ha sido muy semejante en la totalidad de los espacios, pues los mecanismos se han creado, en gran medida, forzados por las exigencias laborales y sociales.

La máquina ha acompañado al hombre en la Historia, desde que en el Neolítico aparecieron las primeras herramientas susceptibles de ser llamadas así.

De cómo hemos ido conociendo la evolución de los mecanismos tratan, en la ponencia presentada al I Congreso de IN-GEGRAF, los Doctores Ricardo Villar del Fresno, Jesus Oti Velasco y César Otero González,⁷ denominada "El ayer y el hoy del dibujo técnico", donde hicieron un resumen minucioso de la representación gráfica a lo largo de la Historia, su evolución y su relación con los mecanismos. Por su contenido histórico, en el que aparece el desarrollo del dibujo técnico y la aportación personal de los autores bien merece ser mencionado.

⁷ VILLAR DEL FRESNO, R Y OTROS. *El ayer y el hoy del dibujo técnico*, pág. 1.

La representación de los útiles y las máquinas primitivas, tanto civiles como militares, se ha efectuado generalmente en los objetos de ornamentación. Se observan en frescos, en tumbas y en utensilios de uso familiar, como jarrones, vasos, copas, etc.

Otros datos sobre los mecanismos figuran en las descripciones de los historiadores. La explicación de la utilidad, la forma y, en menor grado, el funcionamiento de las máquinas observadas aparecen como parte de sus relatos que a veces no son fáciles de entender por no ir acompañado de la imagen. En contadas ocasiones estas descripciones fueron representadas por hábiles dibujantes que dedujeron las formas por la descripción, pero hasta el siglo XIII ninguna se ha encontrado que no fueran las realizadas en los objetos de uso y ornamentación.

Algunas referencias escritas son ocasionales y se reducen a simples menciones relatadas por el escriba que acompañaba en las contiendas a los ejércitos, por el viajero que posteriormente narra sus vivencias o por el poeta que las menciona en su obra. Las máquinas de guerra sí son algo mas frecuentemente mencionadas, ya que demuestran el poder ofensivo del ejército que las poseía.

Son contados los escritores anteriores al siglo XVIII que han realizado obras en las que el tema central y único fueran los mecanismos. El más conocido es Vitruvio, maestro de la construcción del siglo I que entre sus descripciones, principalmente arquitectónicas, incluyó algunos mecanismos. A partir de él,

hubieron de pasar doce siglos para que otro maestro, Villar de Honnecourt, realizara sus Cuadernos.

Los documentos que existen de las obras de Vitruvio contienen descripciones de máquinas pero no aparecen dibujos de ellas, aunque son muchos los historiadores que suponen que existieron. Estas descripciones han sido interpretadas y representadas en sus obras por tratadistas de esta materia.

La primera traducción al castellano la realizó el arquitecto Miguel de Urrea en 1582. Esta obra sí contiene dibujos y según el prólogo de la edición facsímil, algunos de ellos fueron tomados de ediciones algo anteriores y principalmente del incunable sobre la obra de Vitruvio aparecido en 1487, primera edición con ilustraciones explicativas.

El cuaderno de dibujos de V. de Honnecourt, documento del siglo XIII, contiene, junto a otros de arquitectura, testimonios excepcionales de las ciencias y las técnicas. El autor comenta en él:

"En este libro encontrareis gran ayuda en la albañilería y en las máquinas de carpintería, lo mismo que en el retrato, los dibujos, tal y como el arte de la geometría lo manda y enseña."⁸

Es el primer documento extenso de una obra dedicada en su totalidad a la representación de motivos de la construcción y de instrumentos. Al contrario que Vitruvio, el autor hace predominar el dibujo y las descripciones marginales solo sirven de

⁸ HONNECOURT, V. de. *Cuadernos*, introducción de Erlander-Brandenburg.

ayuda para la comprensión de ciertas partes del boceto. La asociación de AVISTA que se ha creado para el análisis y estudio de estos cuadernos, ha realizado publicaciones en las que analiza los dibujos y datos que aparecen en ellos. Los Cuadernos cuentan con seis ediciones comentadas, además de 20 libros y artículos sobre el contenido y las influencias sociales de esta obra. Todas ellas se detallan en la página web que la asociación tiene abierta en Internet.

A partir del siglo XVI, Leonardo de Vinci dibuja sus máquinas, aunque no con idea de publicarlas. Los tratados de G. Agrícola (1556), los realizados por Ramelli (1588), Zonca (1607), Strada (1609) y otros, muestran un conjunto de maquinarias con soluciones muy novedosas aunque algunas de ellas irrealizables.

La primera divulgación específica y general que sobre este tema se ha realizado, es la “Historia de la Tecnología”, compuesta de cinco volúmenes y publicada por Oxford Clarendon Press en 1949, a requerimiento de Imperial Chemical Industries Limited⁹.

La representación gráfica de la inmensa mayoría de las máquinas primitivas se ha realizado interpretando las descripciones de ellas pero sin dibujos que las defina, lo que ocasiona, lógicamente, diferentes resultados según la época en que se realizaron. Se transcribe a continuación la traducción realizada por Urrea, del texto de Vitruvio, en el que describe un molino

romano movido por rueda hidráulica. Tras explicar en ese mismo capítulo una rueda que saca agua por sí misma, dice del molino:

"Defte mifma manera andan las idraulicas, que fon los rodeznos de los molinos adonde hay las mifmas cofas, faluo que en una cabeça del exe tienen un timpano con dientes encerrados, el cual puesto por el compas al cuchillo, que es el carrilete, anda alrededor juntamente con la rueda. Cerca defte timpano ay otro mayor con dientes, y llano, con el cual fe tiene el exe, y tiene en lo alto un clauo de hierro, có el cual fe tiene la muela, y afsi los dientes del timpano, qéftan metidos en el exe, impeliendo los dientes del timpano llano, hazen que las muelas den buelta. En efta machina eftá colgada la tolva que da a las muelas trigo, y boluiendofe, fe haze la harina".¹⁰

El dibujo de la figura 1.1 presenta algunas diferencias con la descripción; obsérvese que llama tímpano con dientes encerrados al situado en el extremo del eje de la rueda hidráulica y rueda plana a la situada en el extremo de la muela, estando dibujada, como ha de ser, al contrario de como se explica en el texto. De la misma descripción es la siguiente figura 1.2, realizada por otro tratadista contemporáneo¹¹. Se observan en ellas las diferencias de interpretación y de representación, dependiendo de la época en que se ha realizado el dibujo.

⁹ DERRY, T.K. Y TREVOR, I. W. *Historia de la tecnología*, prólogo.

¹⁰ VITRUVIO POLION, M. *De Architectura*, libro Xº, capítulo 10º, figura 1.1.

¹¹ LILLEY, S. *Hombres, máquinas e historia*, versión 1ª, pág. 41, figura 2.2.

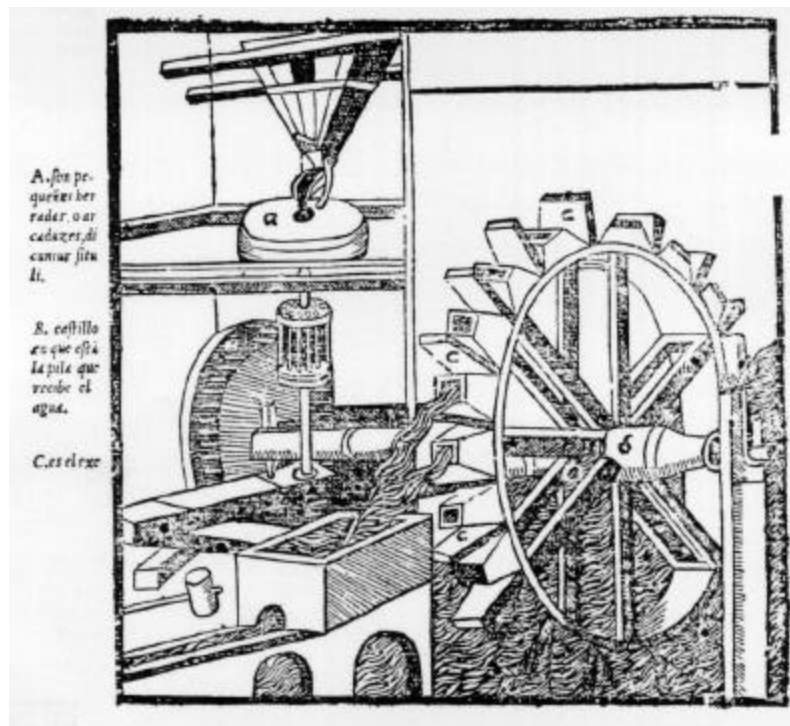


Figura 1.1.

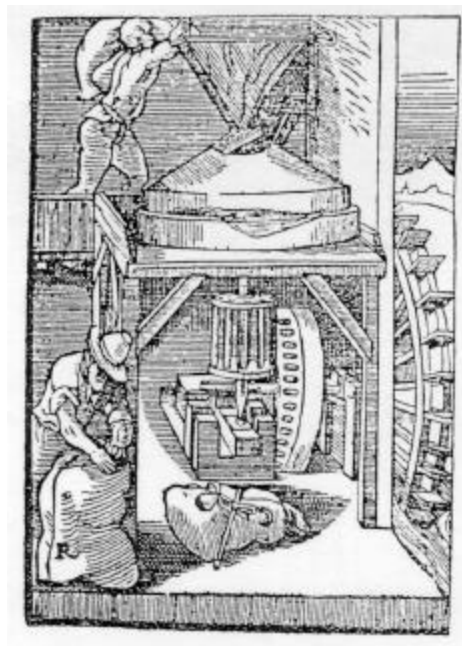


Figura 1.2.

El tema central de esta tesis que se presenta es el estudio de la representación gráfica y del contenido descriptivo de dos mecanismos, referidos por autores de los siglos XIII y XV. Se pretende deducir de ellos la forma y el funcionamiento de una máquina, con aspecto semejante a la original que pueda realizar el trabajo para el que se diseñó. Se ha mejorado la representación porque para la realización de los dibujos se han utilizado los medios actuales. Además pensamos que la máquina real recién construida presentaría un aspecto acorde con su importancia, pues se disponía de hábiles artesanos capaces de lograrlo, como lo hacían en las grandes obras de construcción y en los objetos de arte. La calidad del acabado estaría únicamente limitada por el poder adquisitivo del comprador.

El primer mecanismo seleccionado para su estudio es la sierra hidráulica de V. de Honnecourt, que es, hasta ahora, la primera máquina conocida que, además de la aplicación de una rueda hidráulica que suministrara la fuerza necesaria para serrar, se le incorporó un mecanismo que producía en la pieza un movimiento de avance automático. La representación es muy personal y el autor no la acompañó de explicación alguna.

El segundo es una bomba para extracción de agua de las minas que aparece en la obra "De Re metálica" de G. Agricola. La describe el autor como mecanismo muy novedoso, y representa un conjunto de seis bombas agrupadas de tres en tres, accionadas igualmente por una rueda hidráulica. El dibujo original

es muy bueno y detalla con bastante claridad los componentes del mecanismo.

La diferencia de fecha de ambas representaciones es patente, aunque podría ser que la sierra fuera un primer boceto del autor, dado que la habilidad para el dibujo de Honnecourt, queda demostrada en los demás objetos que la obra contiene.

Se observan en las representaciones deficiencias que aparentan ser propias del dibujo. También aparecen contradicciones en la descripción de la bomba debidas a la dificultad de la traducción de un latín de la Edad Moderna, como el propio traductor menciona o, incluso, a la propia descripción del autor.

Las deficiencias, según nuestra opinión, no permitirían el funcionamiento de ser construidas así. Es por esto posible pensar que tuvieran otras formas de montaje o componentes no captados por el autor del dibujo o que fuera un boceto inicial, como anteriormente opinamos respecto a los dibujos de V. de Honnecourt, que sirviera para la construcción de la máquina, y construida como se representa, se observarían los inconvenientes que, una vez resueltos, no serían reflejados en el dibujo.

Las máquinas analizadas en este estudio, muestran una forma capaz de funcionar de las varias que podía haber tenido el modelo real. Incluso alguna podría haber sido así en la realidad, debido a que los artesanos le podían haber dado distintas apariencias en los diferentes lugares que se construyera. Las máquinas se hacen para cumplir unos objetivos y pudieron variar

su aspecto exterior, circunstancia que se da frecuentemente en la actualidad.

El proceso de estudio seguido es igual en ambos casos, describiéndose en primer lugar el antecedente histórico que contempla las razones que motivan la aparición de este tipo de máquinas y las descripciones y comentarios que de ellas hacen sus propios autores y los posteriores historiadores que las investigan.

En segundo lugar, se analiza y describe el funcionamiento que se deduce del dibujo, comentando brevemente cuanto se haya escrito de este tema. La bomba representada por Agrícola, segunda máquina estudiada, tiene definido su funcionamiento por el propio autor.

Posteriormente, y bajo el punto de vista del que lo analiza, se contemplan las deficiencias que presenta el dibujo o la descripción para el correcto funcionamiento, explicándose la razón o razones que lo impiden o lo dificultan. A continuación se exponen las soluciones propuestas para corregirlas, siempre manteniendo la forma más parecida con el modelo original.

Después son estudiados de forma analítica y gráfica, solamente aquellos defectos observados que para una mejor comprensión de la causa que los produce, es más evidente deducirlos teóricamente.

A continuación, con los datos obtenidos en los análisis anteriores, se procede a diseñar los diferentes elementos que

precisa la máquina, realizándose los dibujos en dos dimensiones. Las medidas necesarias para el diseño son deducidas de los dibujos o de las descripciones, actuando siempre con el criterio de semejanza con el original. Los elementos derivados se obtienen por procedimiento gráfico y analítico, utilizando las técnicas de cálculo y de trazado geométrico ya existentes en la época de aparición de la máquina.

En la última fase del estudio se representan los diversos elementos de la máquina en tres dimensiones, formando con ellos el conjunto visto en perspectiva. Esta fase es necesaria para realizar una imagen virtual de la máquina en la que se compruebe el funcionamiento y sea posible observarlo desde diferentes puntos de vista.

Como segundo objetivo del estudio tratamos de deducir, siguiendo el mismo procedimiento, la evolución que han podido seguir dichas máquinas hasta nuestros días, observando su aspecto y funcionamiento inicial y el que presenta la máquina posterior más próxima en el tiempo de la cual tengamos información. Si se analiza la sierra mecánica que según los libros de Auxonio existía en el siglo IV, se observa que evolucionó hasta la que cita Jacques Strada¹², en el siglo XVII, la cual muestra la herramienta sobre un puente movido por rueda hidráulica, pero transmitiendo el esfuerzo un mecanismo de biela-manivela. Esta máquina es muy similar a la representada por Salomón de Caus¹² en el mismo siglo, con el añadido en ésta del avance au-

¹² GONZÁLEZ TASCÓN, I. *Fábricas hidráulicas españolas*, pág. 460 y 462.

tomático de la pieza. Otra representación posterior es la construida en el siglo XVIII para el arsenal de la Habana (Cuba)¹², muy parecida a las anteriores, pero que dispone sobre el puente de varias sierras que cortan simultáneamente. Las de cinta y de disco ya son mecanismos muy perfeccionados y con distinto principio de funcionamiento, accionados por motores rápidos, que aparecen a principio de este siglo.

De la sierra se han realizado dos diseños, el primero es deducido del dibujo y en él se han supuesto varias soluciones que permitirían el funcionamiento de la máquina, aunque con resultados de dudosa eficacia o, cuanto menos, poco prácticos. El segundo es un modelo derivado que representa un tipo de máquina evolucionado, en el cual se eliminan las deficiencias que hacen poco eficaz el anterior. Lo hemos considerado como un modelo posterior salido de la experiencia con el primero.

La bomba de pistón sigue la evolución con la mejora de la estanqueidad de las válvulas que se muestra en el modelo propuesto y el perfeccionamiento de las tuberías, pero variando muy poco el sistema utilizado. Es éste el sistema adoptado por Newcomen para acoplarlo a su máquina de vapor. Las siguientes innovaciones son básicamente distintas en el funcionamiento; son el ariete hidráulico de finales del siglo XVIII y la bomba centrífuga, invención de primeros de este siglo que precisa para funcionar un motor de gran velocidad de giro.

De la bomba se han realizado otros dos modelos pero, a diferencia de la sierra, en éstos se utiliza el mismo sistema, va-

riándose únicamente el sistema de transmisión del movimiento de la rueda motriz a los émbolos. La corrección de las deficiencias es similar en ambos casos, pero el aspecto exterior varía debido a la diferente forma de transmisión de la potencia. En este caso lo hemos considerado como dos modelos de máquina salidos de dos diferentes formas de interpretación del dibujo.

La lenta transformación ocurrida en las máquinas, sin duda, generó otras intermedias que irían incorporando mejoras en las piezas, en los materiales y en el accionamiento que afectarían también al aspecto externo, hasta llegar a los mecanismos del siglo XVII y XVIII, de los que de la mayoría existe documentación e incluso se conservan en museos de la ciencia y tecnología.

La desigual interpretación del dibujo, incluso de la contemplación de una máquina ya construida, de distintos observadores, daría lugar a la fabricación de otras de distinto aspecto pero con el mismo resultado práctico que, al evolucionar y perfeccionarse, generarían otras de aspecto aún más diferente.

De igual manera puede ocurrir en la interpretación del texto que describe una máquina. El resultado sería un modelo representado que en su aspecto general puede ser diferente del modelo original y diferir de otro de distinto autor.

En resumen, las ideas aplicadas para la realización del diseño virtual son:

1°. Las modificaciones aportadas suplen aquellas deficiencias observadas que impedirían un correcto funcionamiento de la máquina, pero intentando afectar lo mínimo posible al aspecto del dibujo primitivo.

2°. Se realizan ciertos cambios que podrían haber sido utilizados en posteriores modelos algo más perfeccionados, con objeto de establecer hipótesis sobre la evolución de la máquina, hasta el modelo real más antiguo conservado.

3°. Los mecanismos utilizados en los diseños y los escasos cálculos aplicados son los conocidos en la época de creación de la máquina.

Este estudio técnico de los mecanismos en sus comienzos busca obtener una de las varias representaciones de ellos, lo más cercana a lo que fueron en la realidad, diseñada con la idea de hacer posible su funcionamiento. La representación virtual permite ver el aspecto que tendría la máquina en movimiento desde diferentes ángulos, facilitándose la comprensión del mecanismo en su conjunto.

En esta forma de analizar y presentar modelos funcionales de aquellos mecanismos más representativos de la tecnología, así como de la evolución seguida por cada uno de ellos, pensamos que se encuentra una parte de la Historia de la Tecnología no contada. Es la referente al aspecto funcional y al cambio continuo y pausado que han experimentado los útiles y las má-

quinas y que, por circunstancias diversas, hasta ahora no se han abordado didácticamente.

La propuesta de deducir técnicamente el perfecto funcionamiento y desarrollar la evolución y progreso de las máquinas desde sus comienzos, pensamos que coincide con la idea expresada por ELIOT cuando dice:

"Todo lo que la preocupación por la civilización puede impulsarnos a hacer es mejorar la que tenemos, porque no podemos imaginarnos otra"¹³.

Y con la agregada en el mismo lugar de su obra, refiriéndose a las creaciones de los demás de que

"Se está continuamente construyendo una nueva civilización."¹⁴

El estudio que se presenta a continuación, lo hemos considerado como un muy merecido homenaje a todos los artesanos anónimos que, con imaginación y habilidad, diseñaron las máquinas capaces de acelerar el progreso de la humanidad en aquellos años de estrecheces generalizadas. No figuran sus nombres en ninguna bibliografía y sus creaciones, realizadas con materiales perecederos y sometidas a trabajos violentos, desaparecieron una vez cumplido su cometido. Solo la curiosidad y el deseo de hacer historia, han legado a las demás generaciones el dato revelador de sus formas.

¹³ ELIOT, T.S. *Notas para la definición de la cultura*, introducción, pág. 21.

2. – BREVE RESEÑA HISTÓRICA.

El uso de herramientas, para facilitar el trabajo y obtener los productos necesarios de la caza y de la pesca, ha distinguido al homo sapiens del resto de los homínidos. Estaba capacitado para entender la ayuda que representaba usarlas y para preservarlas con objeto de poder posteriormente disponer de ellas. Además podía construirlas y adquirir experiencias con su uso que después utilizaba para mejorarlas.

El diferente modo de vida que le ocasionaba las lentas, - para la corta vida del humano-, variaciones del clima, fue obligándole a ir desarrollando nuevas técnicas y utensilios que le facilitaran su uso en las cambiantes condiciones atmosféricas.

Para el hombre primitivo (y para el actual) era una necesidad crear métodos y herramientas eficaces que remediaran sus carencias y le permitieran vivir y evolucionar. Y como ser pensador progresó, ayudado de los útiles y mecanismos que construyó.

Algo similar a como la evolución de las especies actuó sobre todos los seres vivos, obró la necesidad de búsqueda de la subsistencia sobre el ser humano, obligándolo a conseguir medios y procedimientos que le permitieran avanzar con éxito en la continua y cada vez más competitiva tarea que le representaba la subsistencia.

A partir del neolítico el hombre extrae productos de la tierra que ha de cultivar y estabula y domestica a los animales que le servirán de alimento, necesitando nuevos y mejores medios para poder desarrollar las nacientes tareas. Los cambios son muchísimo más rápidos que lo fueron en épocas precedentes, impulsados por las necesidades.

Conforme las innovaciones en la obtención de alimentos y en el hábitat van haciendo que el hombre pase de nómada por obligación a sedentario, se producen mejoras en los procesos necesarios para el vivir diario y se obtienen los nuevos útiles cada vez con más rapidez. Y así continuó hasta nuestros días.

Repasaremos dentro de este breve resumen las grandes etapas de la historia y dentro de ellas las áreas que influían más directamente en el desarrollo de la humanidad, en las que se produjeron la inmensa mayoría de las reformas y los avances en los mecanismos.

2.1.- LA PREHISTORIA.

Al hombre primitivo, cazador y consumidor, le bastaba con la lanza, el cuchillo y el hacha, para conseguir abatir a sus piezas y descuartizarlas y para obtener los demás alimentos que la vegetación natural le ofrecía.

Los útiles fueron perfeccionándose y fue ampliándose su uso, -se usó el sílex para fabricar cuchillos de diferentes tamaños y se aplicó a la lanza y al hacha-, variando la forma de usarlos con la experiencia adquirida de los anteriores y conforme aumentaban las necesidades del lento crecimiento de población. Si alguno de ellos tenía una gran eficacia en la tarea a la que se dedicaba, porque aumentaba la producción y generaba mejoras en la consecución de sus fines, era motivo para estimular una mayor producción y uso del artefacto e intentar perfeccionarlo.

Es este un larguísimo periodo de la historia en el que los núcleos humanos lo componían pocos individuos y no existía, en la práctica, comunicación entre ellos. El intercambio de ideas entre los grupos se reducía a la competencia y las luchas derivadas de ella, para obtener la parcela que mejor cubriera las necesidades de la comunidad. Las modificaciones y los nuevos utensilios se produjeron con gran lentitud.

Solo se conocen de esta época utensilios manuales y algún útil lanzador de piedras o flechas. Las tribus la componían un reducido número de miembros que solucionaban sus problemas

con los medios que disponían, fabricados de la misma forma que ya lo hicieran sus antepasados milenarios. Las modificaciones se reducían a insignificantes perfeccionamientos realizados por el grupo y cuya divulgación se producía en los contactos accidentales entre las diferentes tribus.

Si el *homo sapiens* se supone que aparece, según las modernas teorías, un millón de años antes de J.C., y la agricultura y ganadería surge, según la idea mas generalizada, en Mesopotamia 8.000 años anteriores a nuestra era, se puede apreciar el lentísimo progreso de la humanidad durante todo el tiempo que separa su aparición del neolítico, ritmo que se mantenía en la evolución de las herramientas.

2.2.- EL NEOLÍTICO Y LA EDAD ANTIGUA.

A medida que los espacios se hicieron insuficientes para el mantenimiento de la creciente población, insuficiencia aumentada a veces por la huida de los animales como consecuencia de los cambios climáticos, se hizo necesaria la obtención de otros recursos, apareciendo en el neolítico la agricultura y la estabulación y domesticación de los animales, lo cual precisó de nuevas herramientas que hicieran posible las tareas que el innovador sistema necesitaba.

2.2.1.- La Agricultura.

Fue el neolítico una etapa de la historia pródiga en invenciones muy superior a etapas anteriores. En ella se empezaron a desarrollar los incipientes procesos para la generación de alimentos a gran escala provenientes de la agricultura y la ganadería, que juntos a los otros anteriores ya mas perfeccionados, -la caza y la pesca-, mitigaron en parte las necesidades que generaba el aumento de población.

En los albores de la agricultura la tierra se labraba y sembraba con la azada de piedra y de la misma forma se recolectaba, separándose el grano por procedimiento manual.

Las herramientas se fabricaron como en los primeros tiempos, pero debido a las nuevas necesidades que originaron las labores del campo, se aceleró su perfeccionamiento, y así, aparecen cuchillos rectos que mejoraron su función y también medios

para afilarlos. Los materiales usados para la fabricación de las herramientas eran piedra, huesos y madera.

El sedentarismo, que la agricultura y la estabulación originaron, dio lugar a una población con tiempo disponible para el ocio, lo que incrementó el número de nuevos procesos y herramientas que fueron facilitando el trabajo y mejorando el rendimiento.

Para la mejora en la agricultura se inventa el arado que ya puede definirse como mecanismo, pues se compone de varios elementos combinados de tal forma que puede ser arrastrado por un animal y dirigido por un hombre. Este arrastre había sido posible por la anterior invención de los sistemas de atelaje, -aún muy primitivos-, necesarios para engancharlo a los animales de tiro. Los primeros arados tenían la reja de madera o hueso y lo arrastraba un animal sujeto a él, produciendo un surco poco profundo.

Otra importante mejora que recibió la tierra fue el regadío que aumentó el rendimiento de las cosechas. El agua se tomaba del curso de los ríos y, cuando no era posible obtenerla directamente del cauce, se extraía de él, bien a mano o con el cigoñal, mecanismo utilizado ya en el siglo XV antes de J.C por los egipcios, que estaba formado por una pértiga larga con una bolsa para el agua en un extremo y en el otro un contrapeso de piedra que podía girar ligeramente por estar situada en un soporte central terminado en horquilla. Se facilitaba con él la elevación de la bolsa llena de agua para después volcarla en un canal.

Pero el mecanismo más usado para elevar el agua de los cauces, incluso en la actualidad en no pocos países del tercer mundo, ha sido la noria. Esta máquina está provista de una rueda que, bien en su periferia o colgando de ella, tenía recipientes que llenaba sumergiéndolos en el agua y los vaciaba al paso por la parte alta. El giro de la rueda precisó que se transmitiera el esfuerzo horizontal del torno movido por sangre a la rueda vertical y se consiguió con un mecanismo similar a un engranaje. Se resolvió de esta forma: un eje vertical que gira por tiro de sangre de una larga pértiga fija a él, tiene unas barras cortas de madera colocadas radialmente que empujan a otras instaladas de la misma forma en la rueda de cangilones¹; de esta forma el giro del eje se transmite a la rueda por el empuje de los radios y eleva el agua en los recipientes. Una estructura de madera que dispone de una plataforma en la parte superior sobre la que caminaba el tiro, soportaba todo el sistema.

¹ LILLEY, S. *Hombres, máquinas e historia*, pág. 17, fig. 2.2.1.

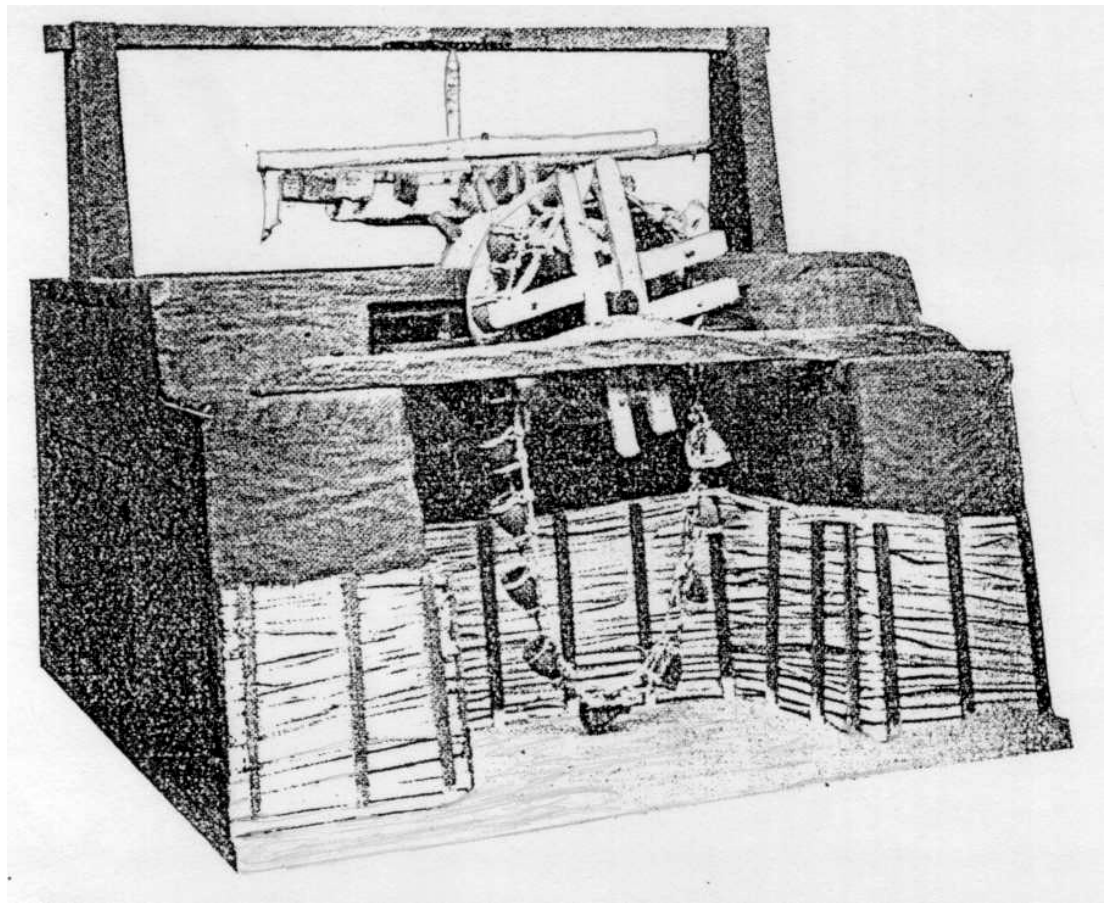


Figura 2.2.1. Noria de canjilones movida por bueyes, s. II a. C.

2.2.2.- La Energía.

La primera forma de energía que el hombre empleó fue el fuego. Lo utilizó para todo, preparación de alimentos, defensa contra las inclemencias del tiempo y contra los animales, roturación y sobre todo, le sirvió para obtener los metales, lo que representó un punto de inflexión muy importante, en la fabricación de útiles y mecanismos, disminuyendo de forma espectacular el tiempo que hasta ahora se había empleado en progresar.

El agua fue empleada desde muy antiguo como fuente de energía para el movimiento de los mecanismos. A principio de

nuestra era se aprovechaban sus cursos, para hacer girar ruedas provistas de palas que impulsaba la propia corriente. Cuando el caudal de agua era suficiente, éste era el procedimiento usado en sustitución de la fuerza animal. El principio es inverso a la noria utilizada para la elevación del agua, sustituyendo las vasijas por palas. Si el desnivel era suficiente y el agua se recibía por la parte alta se utilizaban vasijas, obteniéndose con esto mas fuerza en la rueda, ya que se sumaba al impulso recibido el peso del agua en ellas.

Utilizada como elemento motor la rueda hidráulica transmitía su movimiento a un eje de madera, cuyo giro, -de la misma manera antes explicada para la noria con radios en el eje y en la rueda-, lo transmitía al eje, o a la horquilla según el tipo de molino empleado, que hacía girar a las piedras moledoras. La figura 2.2.2 representa la reconstrucción de un molino hidráulico siguiendo la descripción dada por Vitruvio hacia el año 16 a J. C.² Es ésta otra forma de interpretar la descripción de Vitruvio diferente a las representadas en la Introducción.

La fuerza del viento se ha usado pero no de forma tan temprana y extendida como la energía hidráulica. El uso más primitivo y desarrollado fue en la vela para la navegación, siendo los primeros datos del empleo en tierra los que proceden de

² REYNOLDS, T.S. *Stronger than a hundred men*, pág. 39, fig. 2.2.2.

la experiencia de Herón, no demasiado contrastada, que movía un fuelle de órgano, no conociéndose ningún otro.

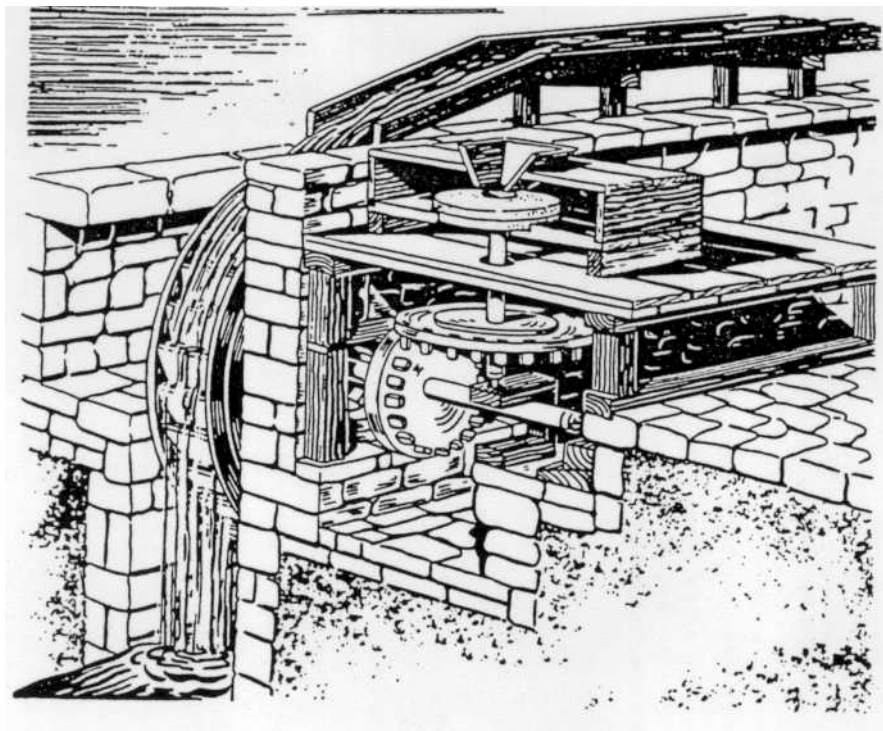


Figura 2.2.2. Molina de agua romano, s. V.

2.2.3.- La minería.

Era un poderoso medio con el que contaban las ciudades ya consolidadas. La explotación de las minas a gran escala precisó de nuevos métodos para extraer y transportar la inmensa cantidad de tierra necesaria para la obtención de los metales.

Aparecieron muy temprano mecanismos que facilitaron la subida del material a la superficie, tales como la polea y el torno ambos movidos en principio a mano.

La rueda y el moderno y más efectivo atelaje de los animales de tiro, permitieron el transporte de las extracciones de

las minas y el de las menas hasta los hornos, normalmente distantes de las bocaminas.

Los transportes reciben un fuerte impulso en este periodo con la invención de la rueda. Anteriormente habían sido usados los animales para el traslado de los materiales y, si eran piezas pesadas, para facilitar su desplazamiento se usaban troncos cilíndricos colocados entre el terreno y la carga. La utilización de la rueda permitió el transporte a mayores distancias de las personas y de las mercancías, sobre plataformas arrastradas por animales de tiro, aumentando con ello el intercambio comercial y cultural de las distintas comunidades.

2.2.4.- Los transportes.

La navegación también experimentó grandes transformaciones con la utilización del remo y más tarde con el uso de la vela, que facilitaron el cabotaje e hicieron posible la colonización de todo el litoral del mundo conocido. El viento es utilizado como impulsor de las naves después del siglo 30 antes de J.C.

2.2.5.- El Textil.

La industria textil recibe en este periodo una gran transformación. Hasta el neolítico el hombre solo había usado para protegerse del frío la piel de los animales que cazaba. A partir del descubrimiento de las fibras, tanto vegetales como animales, se inició la hilatura y de ella el tejido que desplazó con rapidez

a la piel animal, debido a su mayor flexibilidad, facilidad de confección y economía.

El hilado de estas fibras se realizaba a mano; primeramente se peinaba y estiraba, y después se hacía girar desplazando la palma de la mano sobre una superficie. Posteriormente el retorcimiento se hizo girando la varilla que soporta la bola de

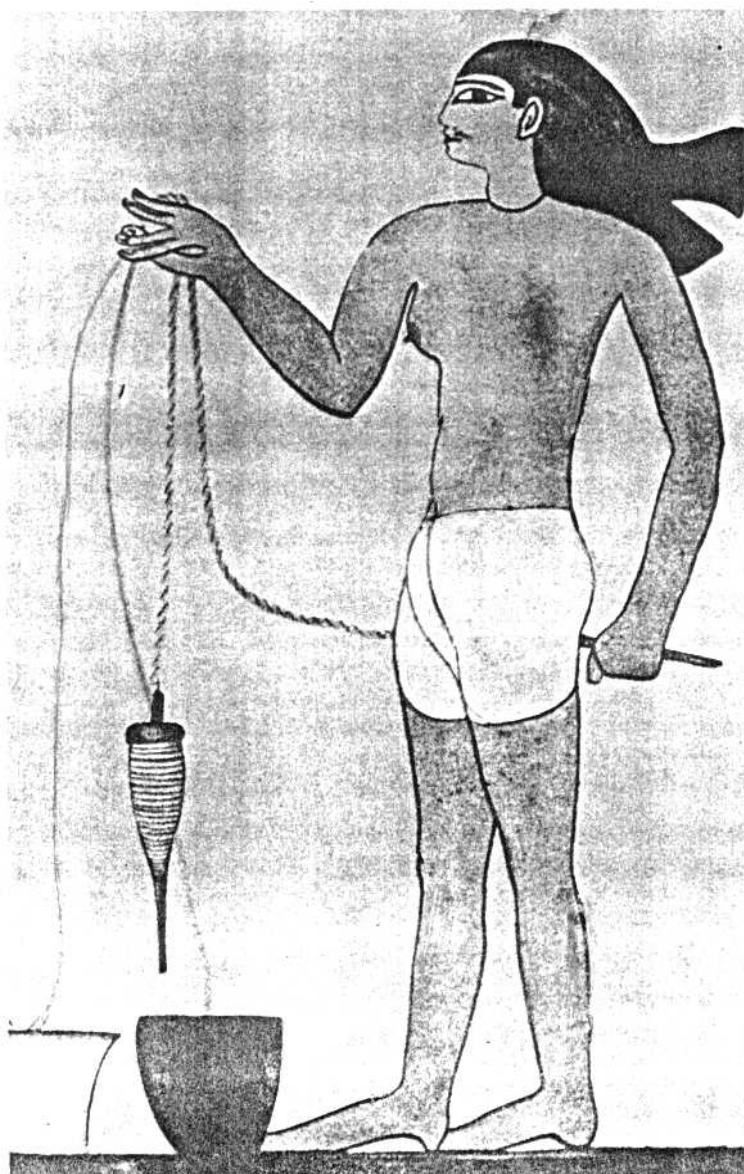


Figura 2.2.3. Hilandera Egipcia de la XII Dinastía.

fibra previamente peinada, colgada de la parte hilada³. El tejido era manual, y se realizaba en los hogares.

2.2.6.- Los metales.

El desarrollo de la metalurgia permitió la utilización de los metales en la fabricación de los mecanismos, haciéndolos más eficaces y duraderos. Los primeros metales obtenidos son los blandos que se encuentran en estado más puro; el oro, la plata, el cobre, el estaño y el plomo, eran los más fáciles de obtener.

A partir del año 3.000 antes de J.C., mezclando el cobre y el estaño se obtuvo el bronce, material mas resistente que permitió sustituir la madera, el hueso o la piedra, para la fabricación de muy diversos útiles, sobre todo los de corte.

La fusión de los metales blandos se logró con el empleo de fuelles que activaban la combustión elevando la temperatura de los hornos, hasta obtener la de licuación.

El hierro forjado se obtuvo sobre el año 1.100 anterior a J. C. Este material era de dureza superior a los demás conocidos y desde su descubrimiento fue usado en aquellos elementos que necesitaran de gran resistencia y fiabilidad, dado lo difícil que era alcanzar la temperatura necesaria para obtenerlo. Sobre todo fue utilizado para la fabricación de armas y máquinas de guerra.

³ REPRESENTACION GRÁFICA EN *Enciclopedia Técnica CIESA*, fig. 2.2.3.

El hierro de forja se obtenía martilleando una masa incandescente de mineral de hierro y escoria, obtenida en hornos de barro mezclando el mineral de hierro con combustible vegetal. Cuando perdía temperatura y maleabilidad volvía a ser calentada en el horno y logrado el estado pastoso era de nuevo martilleada. Así se continuaba hasta que perdía la mayor parte de la ganga, quedando un material de hierro mas compacto y muy impuro que podía ser trabajado, obteniéndose la forma deseada.

De bronce y de hierro se fabricaron herramientas y máquinas de corte superiores en duración y en eficacia a las anteriores de piedra o hueso, y además fue posible la construcción de uniones y soportes firmes para su utilización en la construcción, la minería y la industria. Los molinos, batanes, martinetes, fuelles y otros mecanismos poderosos, aumentaron la eficacia con disminución del tamaño, haciéndose de ellos cada vez un uso más habitual.

2.2.7.- La medida del tiempo.

No fue necesaria en estos tiempos en los que la subsistencia se centraba en la agricultura, la caza y la pesca, y en la que el obrero, siervo o esclavo, trabajaba de sol a sol para obtener su remuneración o simplemente su mantenimiento. Los relojes de sol, conocidos desde principio de este periodo histórico, eran contruidos para la ornamentación y no tenían utilidad práctica, y los de arena solo podían dar idea de un periodo de tiempo concreto sin relación con la hora solar.

Los relojes movidos por agua denominados clepsidra, producían un movimiento periódico por el tiempo que tardaba en llenarse de agua un pequeño recipiente que una vez lleno se volcaba, produciendo un empuje a una rueda de radios que tenía una aguja indicadora. Los de pesas, más conocidos pues aún se emplean en la actualidad, precisaban de sistemas relativamente complejos y poco fieles que frenaran la caída acelerada de los pesos para ajustarlos a la medida de tiempo deseada. Estos dos sistemas, que solo movieron un elemento indicador, se supone que existieron en China antes de nuestra era. En Europa sin embargo no se tienen pruebas de que fueron contruidos antes del siglo VIII.

2.2.8.- La industria.

Las armas y máquinas de los ejércitos se desarrollaban más rápidamente que los mecanismos de uso civil. Se fabricaron armas de uso personal con bronce o hierro, y también artefactos para la defensa, el ataque, el transporte de los pertrechos y la intendencia. Se construyeron, reforzados con los metales, aparatos lanzadores que empleaban como resorte, cuerdas muy retorcidas y después estiradas con un torno que, una vez liberadas, tomaban su forma primitiva actuando como ballesta.

A parte de las herramientas de corte, se conocen pocos mecanismos diferentes de los ya mencionados anteriormente. La barrena con giro alternativo de la broca de hierro mediante un

arco y una cuerda⁴, fue una herramienta usada a partir del 1200 a. de J.C.

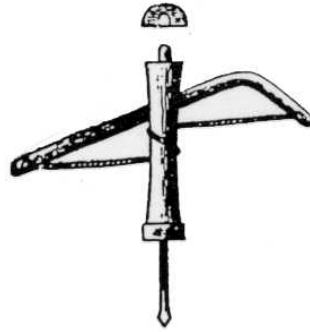


Figura 2.2.4. Taladro de arco, 1200 a. C.

⁴ DERRY, T.K. y otro. *Historia de la tecnología*, tomo I, pág. 501, fig. 2.2.4.



Figura 2.2.5. Grúa movida por un molino de rueda con hombres. I d. C.

Las grúas para grandes cargas disponían de ruedas cilíndricas, en cuyo interior los hombres o los animales, escalaban sus paredes para hacerlas funcionar⁵. Este sistema fue utilizado

⁵ IBIDEM, pág. 355, fig. 2.2.5.

en los casos de tener que aplicar a una máquina grandes esfuerzos por medios humanos.

2.3.- LA EDAD MEDIA.

Desde la caída del Imperio Romano, las naciones, independientemente de los regímenes políticos que fueron adoptando, hicieron más permeables sus fronteras, lo cual influyó en el conocimiento de las técnicas desarrolladas en los países mediterráneos más avanzados, por los viajeros que venían del centro y norte de Europa. Simultáneamente el decaimiento que se produjo en el antiguo imperio, hizo que algunos sectores de la población buscaran nuevos horizontes en los que encontrar el necesario sustento. Este intercambio humano produjo que los conocimientos se expandieran desde el mediterráneo a todos los lugares de Europa occidental.

El aprovechamiento de las fuerzas de la naturaleza fue más frecuente, y así se usó la rueda hidráulica para todo tipo de molienda. Poco se utilizaba la fuerza de la sangre que se ceñía a regiones normalmente secas.

Los cambios sociales que se produjeron fueron muy importantes, con un aumento de la población como nunca se había producido, y las naciones, que se hacían extensas y poderosas, iniciaron la conquista de otras tierras donde enviaban los excedentes de población y producción, aumentando a la vez su comercio y su poder.

La Edad Media fue de tinieblas para las regiones del antiguo Imperio y pocas innovaciones e inventos se situaban en ellas, pero sin duda las invenciones continuaron en un ámbito territo-

rial más extenso ampliándose hacia el norte, y sin disminución de la cantidad, aunque existieran altibajos.

Por causa del crecimiento de la población fueron aumentando las necesidades de los ciudadanos y creándose otras nuevas. Esta mayor demanda necesitó un aumento de la producción, circunstancia que ocurrió principalmente con los alimentos, el textil, y los transportes.

En todo el mundo conocido se mejoró la obtención, el tratamiento y la utilización de los metales, lo que motivó que los mecanismos existentes se perfeccionasen, además de extenderse el uso al ser más asequibles. La sociedad fue inventando nuevos mecanismos que intensificaran la producción y, para facilitar su fabricación, se construyeron herramientas más precisas y potentes.

No es, por tanto, del todo acertado pensar que fuera un periodo de tiempo aciago y sin progreso, se piensa que en los países que anteriormente habían gozado de más prosperidad e influencia, faltó la noticia y se ignoró la realidad. Además los descubrimientos y el progreso se extendieron hacia el norte, lejos del Mediterráneo que fue el antiguo foco creativo.

2.3.1.- La Agricultura.

Las herramientas y máquinas utilizadas no modificaban sensiblemente su forma, tan solo una parte de los materiales usados en la fabricación se sustituyeron por metales. En el ara-

do se produjo una importante innovación al incorporársele unas ruedas y poder ser arrastrado por animales de tiro bien uncidos.

El más antiguo arado sajón con ruedas es del siglo VIII, y producía un profundo surco en terrenos fuertes⁶.



Figura 2.3.1. Arado de rueda sajón.

La mejora en el regadío se produjo en aquellas zonas donde existían corrientes de agua de cierta intensidad, con la utilización de norias más poderosas. La utilización de los metales facilitó la fabricación del mecanismo ya descrito por Vitruvio en el siglo I que combinaba en el mismo la rueda hidráulica y la noria, elevándose el agua con la energía suministrada por la propia corriente. Montaba en una única rueda álabes y vasijas, los primeros hacían girar la rueda y los segundos elevaban el agua.

⁶ CROMBIE, A.C. *Historia de la ciencia*, lámina 23, fig. 2.3.1.

2.3.2.- La Energía.

Puesto que hasta la fecha en tierra firme solo era generada por el agua y la sangre, aparecieron los primeros mecanismos que aprovechaban con eficacia la energía del viento. Los primeros molinos de viento conocidos aparecieron en Persia en el siglo X. Eran de eje vertical y se movían de la misma forma que la rueda hidráulica con el agua. Los álabes eran verticales y se situaban de forma radial sobre un eje. Se hacía girar cubriendo los álabes correspondientes a medio eje y dejando descubiertos los restantes. Los cambios de dirección del viento se corregían fácilmente variando la tela que cubría la mitad de los álabes. Siendo los álabes planos el giro podía ser modificado a voluntad, pero la energía recibida es menor que en el molino de eje horizontal⁷.

El uso del molino de viento empieza a ser frecuente en Europa a finales del siglo XII y se fue extendiendo a todo el continente, siendo casi exclusivamente usado en molturación de grano y elevación de agua. El único tipo usado es el de eje horizontal, existiendo dos sistemas para hacer que el aire incida verticalmente sobre las aspas, soplando en cualquier dirección. La transmisión del movimiento a la máquina, se hace por medio de un juego de engranajes, de la misma forma que en la rueda hidráulica.

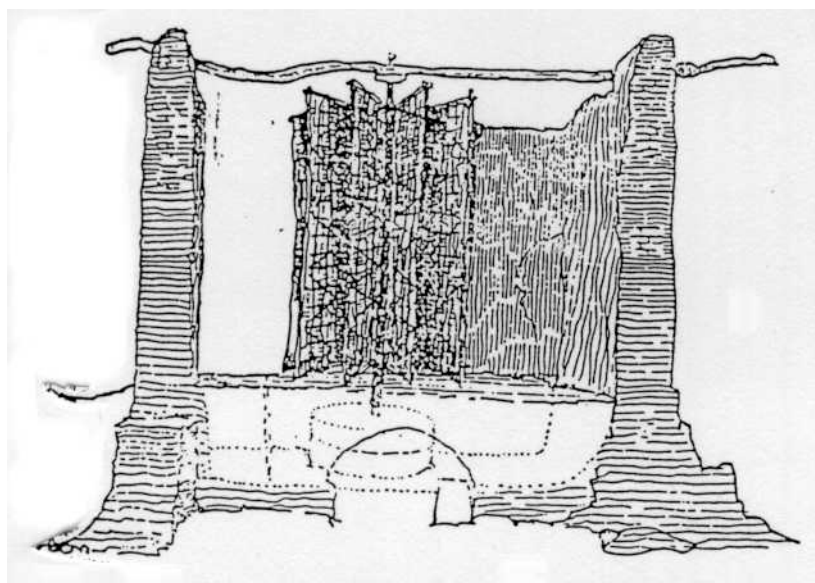
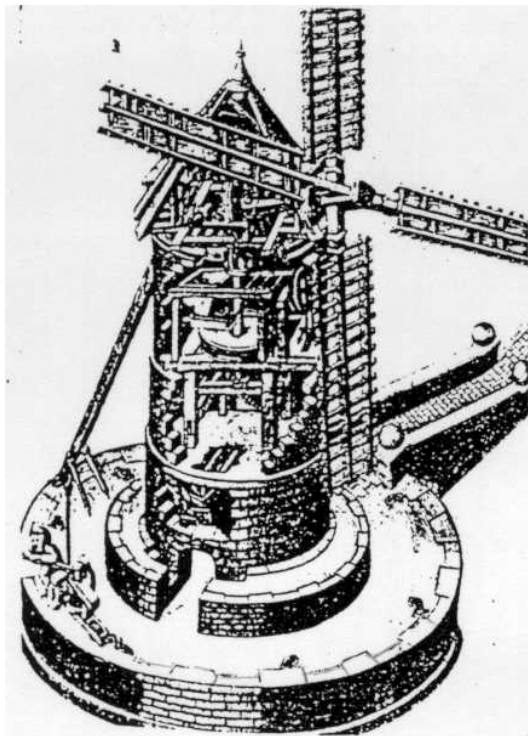


Figura 2.3.2. Molino de eje vertical afgano-persa, s. X.

De los dos tipos de molino de eje horizontal utilizados en Europa, el más antiguo es el de poste o alemán. Está construido, como su nombre indica, sobre un poste en el cual gira toda la estructura. El segundo, denominado de torre, aparece en el siglo XIV y gira solamente la torreta que contiene el mecanismo. Ambos tienen el eje con una ligera inclinación respecto a la horizontal para evitar que las aspas golpeen a la estructura, por la flexión que el viento les produce⁸.

⁷ CARO BAROJA, J. *Tecnología popular española*, pág. 21, fig. 2.3.2.

⁸ LILLEY, S. *Hombres, máquinas e historia*, pág. 32, fig. 2.3.3.



Molino sobre torre.

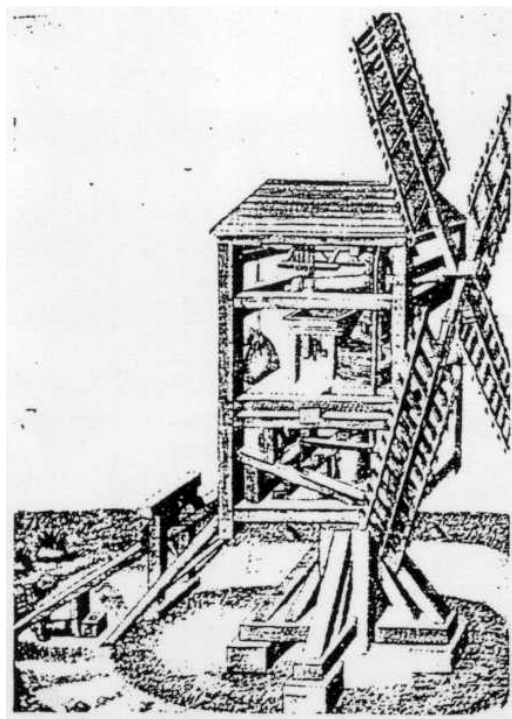


Figura 2.3.3. Molino sobre poste.

2.3.3.- Los transportes.

En la navegación el codaste o timón moderno, que según algunos historiadores se comenzó a usar en China hacia el siglo VIII, se empleó en Europa a partir del siglo XIII. Fue una gran mejora para el transporte marítimo y a partir de ello el hombre se lanzó a la aventura del mar abierto.

La navegación por los ríos se hizo más frecuente y posible con el empleo de las esclusas, que aunque se conocen en China a partir del siglo X, en Europa se construyeron a partir del siglo XIII en mayor número, haciendo navegable sus grandes ríos.

Los transportes terrestres, continúan en este periodo sin ninguna novedad, solamente los medios de transportes personales mejoraron sus sistemas de atalaje y de suspensión, y aumentaron el diámetro de las ruedas, para hacer algo menos incómodos los viajes.

El transporte de mercancías utiliza la navegación, sobre todo para las grandes distancias, reservándose el de corta distancia a las simples plataformas con ruedas que introducen igualmente la mejora de los atalajes y las varas.

2.3.4.- El Textil.

La industria textil seguía en una continua renovación y modernizó muy eficazmente los métodos y las máquinas, obteniendo hilos finos de algodón y lino y, sobre todo, de seda. Las fibras se hilaban con la rueca que permitía mayor rapidez en el

hilado y que posibilitó a las familias hilar la fibra en sus viviendas. Consistía en una varilla para la bola de fibra ya peinada y otra mas corta a la que se sujetaba el extremo de la fibra inicialmente hilada. Esta última varilla se sujetaba en el centro de una rueda que se hacía girar a mano, con lo que la fibra se trenzaba produciendo el hilo. Una vez obtenido y con longitud suficiente se enrollaba manualmente a la primera varilla, iniciándose de nuevo el proceso. El hilado de la seda por ser una fibra continua fue mecanizado antes que las otras, realizándose el proceso con energía hidráulica ya en el siglo XIV⁹.

El tejido se hacía a mano entrelazando los hilos, siendo sustituido este procedimiento en poco tiempo por el telar de confección manual. Se hacía con telares movidos a mano, aunque en China desde el siglo II antes de J. C., se utilizaba el telar de arrastre que permitía tejer piezas complicadas. Este telar de arrastre no fue utilizado en Europa hasta el año 1100.

Los batanes eran accionados por ruedas hidráulicas en el siglo XIII. Movían unos ejes apoyados en soportes con cabeza en forma de horquilla que disponían de álabes solidarios dispuestos radialmente para mover los martinetes¹⁰. Un mismo eje podía mover varios sistemas de álabes formando un conjunto

⁹ ZONCA, V. *De novo teatro di machine et edificii*, lámina 30, fig. 2.3.4.

¹⁰ TURRIANO, J. *Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas de Juanelo*. Fig. 2.3.5.

mecánico muy innovador. Con el mismo procedimiento se movían fuelles de forja, molinos de piedra, bombas de pistón¹¹, etc.

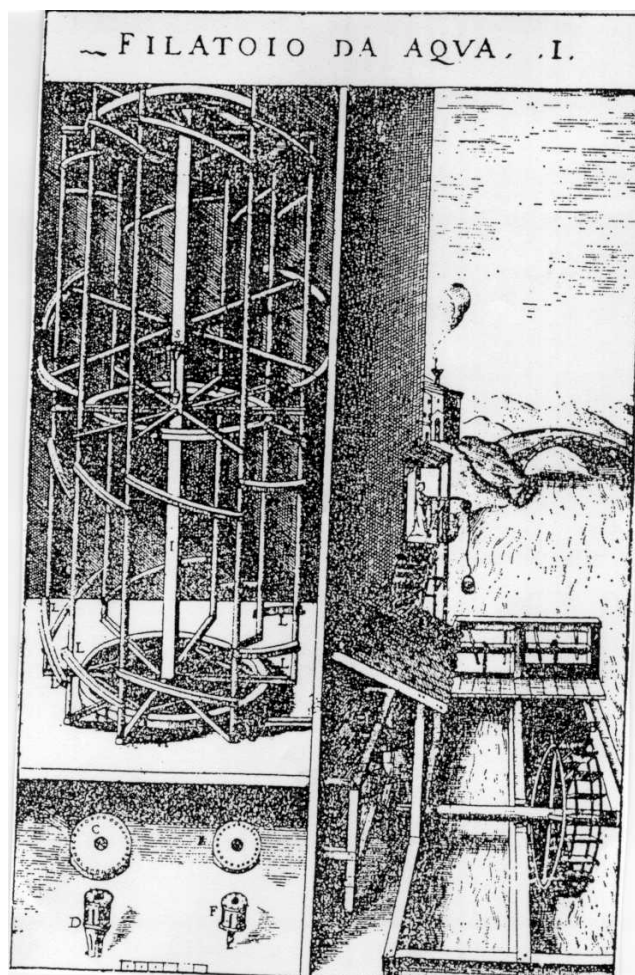


Figura 2.3.4.

¹¹ AGRÍCOLA, G.- *De re metálica*, libro VI, pág. 188, fig. 2.3.6.

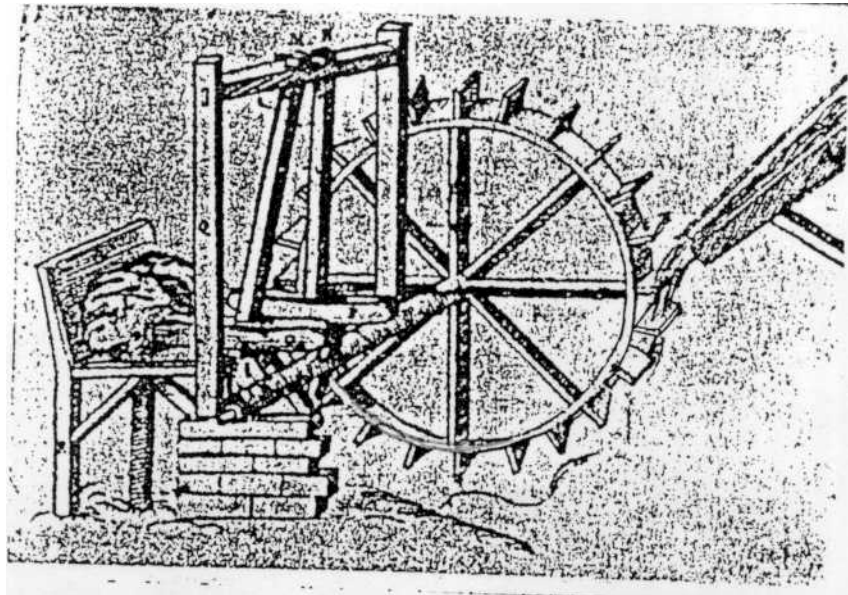


Figura 2.3.5. Batán movido por agua.

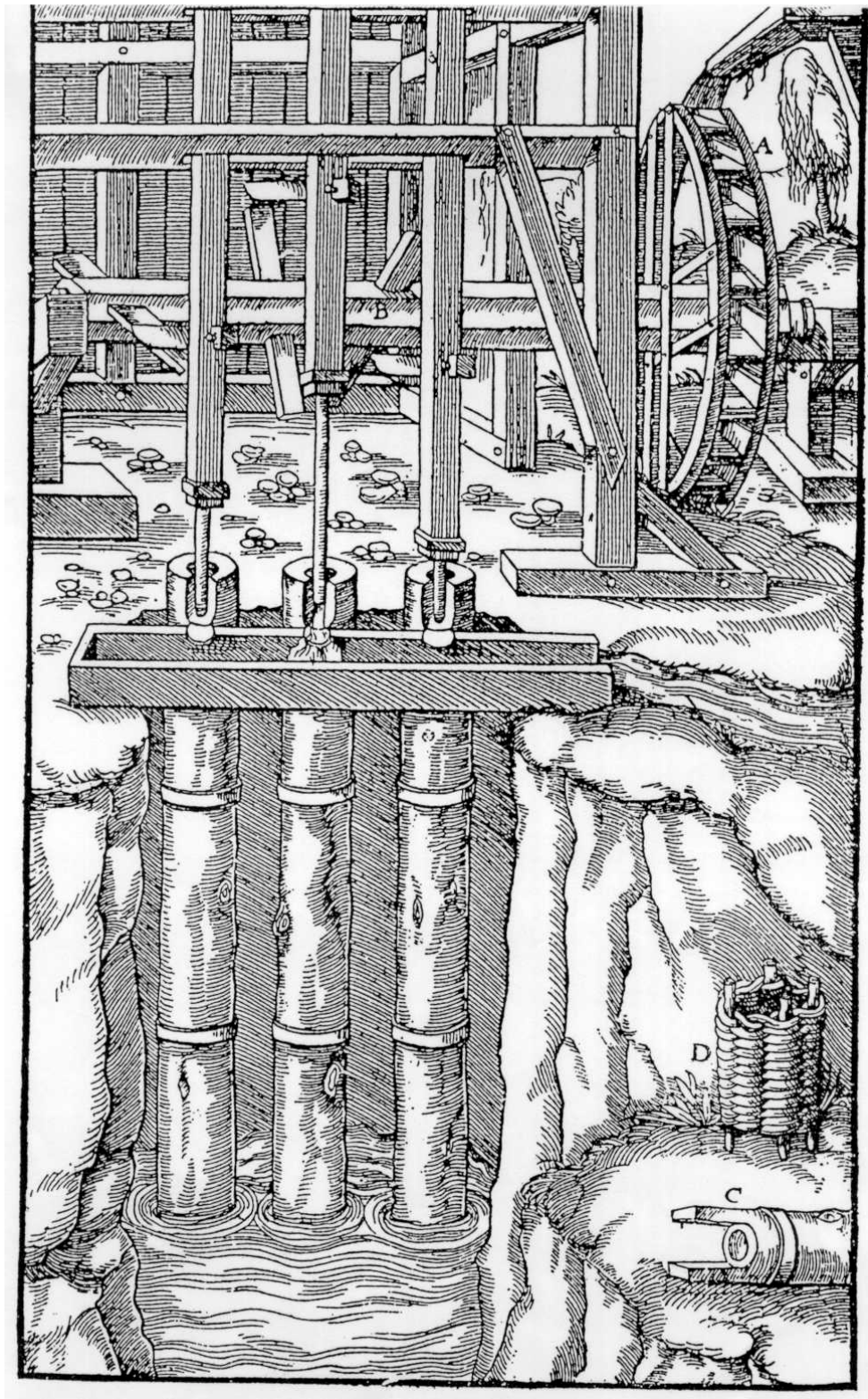


Figura 2.3.6. Bombas de pistón accionadas por rueda hidráulica y levas.

2.3.5.- La metalurgia.

En la edad media la metalurgia perfeccionó los procesos de obtención de los metales y logró otros nuevos. Los metales usados normalmente en la construcción y en los mecanismos, se obtenían con los mismos procedimientos de primero de siglo, mejorándose los procesos con la construcción de hornos de más alta temperatura y herramientas perfeccionadas que en el hierro forjado facilitaron el manejo de la pasta incandescente para el pudelado. La forja catalana, empleada desde primero de siglo, era el procedimiento generalizado para la obtención del hierro.

El hierro fundido se obtuvo por primera vez en el siglo XIII, pero las dificultades que presentaba llegar en los hornos primitivos a la temperatura necesaria para la fusión, hizo que no fuera posible generalizar su uso hasta el siglo XV. Con él se realizaron piezas de una dureza tan extraordinaria que le hicieron comentar a mediados del siglo XIII a Roger Bacon,

- os hablaré... Por primera vez podrán construirse máquinas de navegar sin remeros... carruaje que se mueva a velocidad incalculable sin necesidad de animal alguno que lo arrastre,... máquinas voladoras,... máquinas para sumergirse en los ríos o en los mares sin peligro,... puentes sobre los ríos sin pilares...-¹².

¹² LINDBERG, D.C.- R. B. and the origins of perspective in the middle ages. Pág. 68.

2.3.6.- La medida del tiempo.

El interés que tenía la medida del tiempo, sobre todo para la navegación, hizo que aparecieran en esta época las máquinas complicadas que fueron los primeros relojes mecánicos. Estaban movidas por la caída de un peso que accionaba una sola aguja indicadora, sin mas control que el freno que aminoraba su caída.

Algo más exactos y con más duración del espacio de tiempo medido fueron los relojes de agua, mencionados anteriormente, que fueron perfeccionados y que provocaban la caída del peso a intervalos regulares que era lo que tardaba en llenarse la pequeña vasija de que disponía.

Es bastante probable que en el siglo XIII, se usaran relojes, pero no hay una idea clara de que fueran mecánicos. La fecha que aparece mas comúnmente mencionada para datar la aparición del primer reloj mecánico es a mediado el siglo XIV.

2.3.7.- La industria.

Los primeros tornos para el tallado de la madera precursores del torno actual se construyeron, con parecido procedimiento para mover la pieza al utilizado en el taladro de arco y cuerda mencionado en el apartado 2.2.7. Con objeto de permitir al operario utilizar las dos manos, el movimiento se hacía con el

pie y la recuperación por medio de una rama que actuaba como un muelle¹³.

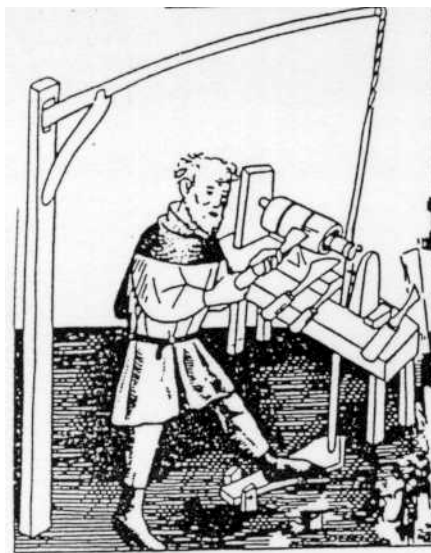


Figura 2.3.7. Torno con biela-manivela, 1395.

Otra invención que se ha calificado muy importante es la rueda de alfarero, mecanismo que aún perdura. Consistía en instalar sobre una bancada similar a una mesa un eje vertical al que se hacían solidarias dos ruedas, una baja la hacía girar el operario con los pies y otra, situada sobre el tablero, era para poner sobre ella la masa de barro a modelar. Así era posible que el artesano trabajara con las dos manos aumentando la producción. Este tipo de modelador accionado con el pie y otras innovaciones posteriores, como plantillas de modelado y hornos de cocción de mayor capacidad y con puertas metálicas, mejoraron

¹³ DERRY, T.K. y otro. *Opus citi*, pág. 500, fig. 2.3.7.

sensiblemente la producción de vasijas de barro¹⁴. Lilley ve en estas simples máquinas que permiten al operario trabajar con las dos manos el comienzo del trabajo en serie.

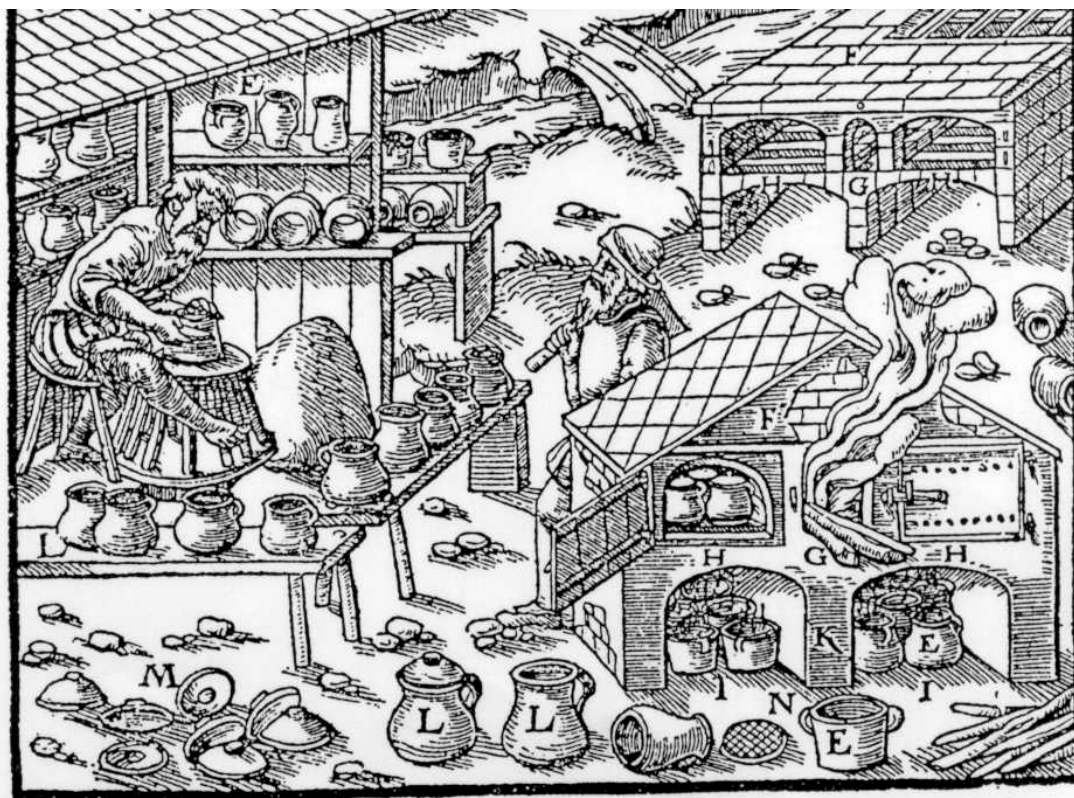


Figura 2.3.8. Rueda de alfarero y hornos.

En este largo periodo de la historia se desarrollaron múltiples herramientas y máquinas, recibiendo buen número de ellas la energía de ruedas hidráulicas. Los aserraderos, el afilado, el estirado de los metales para producir alambres, el trabajo del cuero, la trituración de todo tipo de materiales y la industria en

¹⁴ AGRICOLA, G. *Opus citi*, libro VIII, pág. 11, fig. 2.3.8.

general, en una buena proporción se beneficiaron de esta fuente de energía.

2.3.8.- La Imprenta.

Quizás el logro más importante conseguido en estos mil años, fue la invención de la imprenta, que originó una gran transformación en la difusión de las ideas y del conocimiento. Las letras, las ciencias y el arte, encontraron la posibilidad de aumentar el campo para la presentación de sus creaciones con la impresión de múltiples ejemplares de sus documentos. Fue tal la conmoción causada que las variaciones y mejoras sobre los métodos de trabajo y sobre los útiles empleados en la impresión, superaron en prontitud incluso a las habidas en el textil.

Los primeros pasos de implantación del sistema se dieron en Europa hacia finales del siglo XIV, grabándose el texto en bloques o en tablas, y no pasó medio siglo cuando Gutemberg de Maguncia en 1436, inició la impresión con letras independientes realizadas con plomo, estaño y antimonio, aleación de bajo punto de fusión. Algunos historiadores de la cultura china, mencionan que se conocen impresiones realizadas hacia el siglo VI utilizando signos grabados en tablas, cuestión ésta no totalmente comprobada.

2.4.- LA EDAD MODERNA.

A partir del siglo XV la ciencia pura fue influyendo algo más en el estudio de las máquinas mejorando las prestaciones y modificando sus componentes, incluyendo el mayor empleo del hierro forjado.

Se inició en las naciones adelantadas, la creación de sociedades científicas interesadas en el conocimiento y propagación de las nuevas teorías a todo occidente. La "Academia secretorum naturale" fundada en Nápoles el año 1560, estudió y difundió las teorías de la física y su aplicación a las máquinas, cooperando a mejorar las ya existentes y aumentar el número de invenciones con la investigación de nuevos modelos.

La idea de inventar se extendió por el mundo occidental y más aún en los últimos años de este corto periodo histórico, repleto de acontecimientos sociales, políticos y religiosos. Fueron muchos los artefactos que se inventaron y se dieron a conocer para muy diversas aplicaciones, pero pocos de ellos eran realizables o útiles.

Las máquinas habían demostrado que facilitaban el trabajo y aumentaban la producción, por lo cual diseñar una o introducir mejoras en las ya existentes, ofrecía un aliciente a los expertos y a los ciudadanos con espíritu innovador. De ahí que la fantasía que despertó el ansia de inventar, hiciera aparecer representados, e incluso que fueran patentados, artilugios inútiles de ciencia - ficción, algunos ni siquiera capaces de producir

movimiento. Con el propósito de obtener el movimiento continuo, se diseñaron máquinas complejas que no eran mas que consumidoras de energía, sin posibilidad de ser utilizadas.

Esta afluencia de ideas, entre las que se daban algunas realmente válidas, hizo que los mecanismos evolucionaran y se perfeccionaran con mayor rapidez que en épocas anteriores. El mejor conocimiento de la Física, la mejora de los materiales y de las herramientas empleados en la fabricación y la rápida divulgación de los modelos que proporcionaba el uso de la imprenta, hizo posible la gran dispersión que se produjo de ellos y que culminó con la revolución industrial.

Los procesos de fabricación y producción, aunque fundamentalmente seguían dentro de una idea empírica, fueron progresivamente adoptando la teoría en sus diseños, haciéndose más eficaces y de mayor rendimiento.

A mediados del siglo XVII, se construyeron en el Reino Unido hornos para fundición de hierro que precisaron de grandes inversiones, las cuales fueron aportadas por entidades financieras y particulares acaudalados. El sistema de trabajo existente empezaba a transformarse con la creación de grupos empresariales que construyeron industrias, donde un conjunto de operarios realizaban el trabajo en equipo, iniciándose con ello lo que podría denominarse un protocapitalismo industrial.

La creación de esas grandes empresas en el Reino Unido mediante los nuevos métodos económicos, llevó al país al pri-

mer puesto mundial como nación industrial, primacía que mantuvo hasta el primer tercio del siglo XX. Fue el primer fabricante y suministrador mundial de un buen número de maquinarias, a la vez que su estructura social interior cambió, derivando hacia otra mas organizada con una sólida base económica y sin las restricciones que antes le impusieron los grandes señores y los gremios.

Se considera este momento por diversos autores, como el principio de la revolución industrial de occidente.

2.4.1.- Leonardo da Vinci.

En esa época nació el genio más conocido posiblemente de todos los tiempos; fue Leonardo de Vinci (1452-1519), creador generalista que además de sus obras pictóricas, escultóricas y arquitectónicas, dibujó casi 5.000 bocetos publicados años después de su muerte, de los que una cuarta parte eran máquinas y sistemas mecánicos. La mayoría eran difíciles de llevar a la práctica no solo en su tiempo sino también en la actualidad, pero se tomaron como modelo por otros inventores que crearon máquinas con la misma o parecida forma de las representadas y, sobre todo, con la misma finalidad que su creador consideró.

Dibujó mecanismos que transformaban el movimiento circular en rectilíneo, engranajes rectos y cónicos, cadenas de transmisión, rodamientos, todos ellos fundamentales en la mecánica y diferenció la máquina motriz del mecanismo que

realiza el trabajo, principio esencial para la transformación del movimiento.

2.4.2.- La energía.

La potencia que necesitaban las nuevas máquinas aumentaba conforme lo hacía su capacidad de producción. Por ello, las ruedas hidráulicas, únicos medios capaces de suministrar la energía en forma continua, aumentaron de tamaño, llegando a suministrar una potencia de 20 CV (otros autores dan 10 CV como máxima potencia obtenida, extremo este difícil de precisar por los diferentes efectos que inciden sobre el resultado) y se aplicaron a una buena parte de los procesos, mediante mecanismos intermedios. Pero conseguir esas potencias estaba reservado a zonas de corrientes superficiales de abundantes aguas.

Las ruedas hidráulicas se mejoraron y perfeccionaron, consiguiendo aligerar el peso y mejorar el rendimiento, con la utilización del hierro en las estructuras y en los ejes. La rueda normanda con álabes horizontales, tiene el diseño parecido a la actual turbina hidráulica. Es semejante a los rodeznos utilizados en los más modernos molinos de cubo, utilizados en las zonas de fuertes pendientes y con poco caudal, de los cuales Málaga instaló buen número de ellos a principio de siglo.¹⁵

¹⁵ ESCALERAS, J. y otro. *Molinos y panaderías tradicionales*, pág. 73.

El aprovechamiento de la energía eólica fue extendiéndose a todos los países, en especial a aquellos que no disponían de agua corriente abundante y continua. En los Países Bajos se llegaron a conseguir hasta 14 CV con los molinos de torre. Eran empleados en moliendas, batanes y para el bombeo de las zonas pantanosas, pero no en otras aplicaciones debido a su irregularidad.

La necesidad de disponer en las minas y en las factorías de mayor cantidad de energía y constante, hizo que se investigara la obtención de otras nuevas fuentes no dependientes de las variaciones meteorológicas, ni del cansancio que con el esfuerzo padecen los seres vivos.

Desde el principio de nuestra era, ya se conocían las propiedades del vapor de agua y el trabajo que era capaz de desarrollar al expansionarse, pero hasta el siglo XVI no se hicieron los primeros estudios para tratar de aprovechar esta posible fuente de energía

El conocimiento de la turbina a vapor de Herón del siglo I después de J. C., dio origen a múltiples estudios y ensayos sobre el uso del vapor como forma de energía, pero no se obtuvo ninguna aplicación práctica hasta principios del siglo XVIII, debido, entre otras cuestiones, a la limitada resistencia de los materiales conocidos y las pocas posibilidades de mecanizar los más resistentes con un mínimo grado de ajuste.

Las primeras investigaciones sobre el vapor se realizaron en el continente por Galileo y Torricelli y sus primeros ensayos, como los que también realizaron Della Porta, Worcester, Savery, Denis Papin, Desaguliers y otros, se orientaron hacia la creación de algo de vacío por medio de él. Demostrada por Torricelli a principio del siglo XVII la existencia del vacío y sus efectos, la idea predominante fue crearlo en el interior de un recipiente, condensando el vapor de agua que previamente se había introducido en él, para que la presión atmosférica realizara el trabajo. No se pensó en aprovechar la fuerza ejercida por la presión del vapor al expansionarse.

Tan solo Papin utilizó un pistón en el interior de un cilindro para que una vez producido el pseudo vacío en una cara del pistón, la presión atmosférica actuara sobre la otra desplazándolo y produciendo trabajo. Fue este dispositivo del pistón el que Newcomen utilizó en su máquina atmosférica.

Todos los estudios realizados hasta la época fueron pensados para la elevación de agua de las minas.

Fue hacia finales de este periodo en 1712 cuando Thomas Newcomen, ferretero de Darmouth, inventó la primera máquina independiente de los medios naturales y de la sangre. Estaba formada por un cilindro en cuyo interior se alojaba un pistón que una de las caras comunicaba con la atmósfera y la otra se ponía en comunicación con la caldera. El vapor de agua por medio de una llave pasaba al interior del cilindro donde era posteriormente enfriado y condensado, creando suficiente vacío y ha-

ciendo que la presión atmosférica actuara sobre el pistón desplazándolo. La máquina se alimentaba con carbón mineral para producir el vapor de agua. El movimiento era únicamente lineal alternativo.

En el corto periodo de ocho años se instalaron en minas de toda Europa y en 1775 se habían instalado cientos de ellas solo en el Reino Unido. A pesar del bajo rendimiento que obtenía su eficacia fue total, marcando el principio de la era del vapor.

2.4.3.- La Minería.

Hubo de incrementar su producción, debido principalmente a la demanda de las industrias. Las extracciones se hacían a mayor profundidad, facilitadas por el empleo de nuevos mecanismos, accionados por fuerza hidráulica o de sangre.

Para extraer el agua y los materiales del interior, se utilizó en las bocaminas el malacate, que podía ser accionado por animales de tiro¹⁶, o por una rueda hidráulica¹⁷, ambas se utilizaron en el siglo XV. Estos aparatos elevadores tenían un eje con un gran tambor en el que se enrollaban en ambos sentidos dos cadena con gancho, para subir la carga y a la vez bajar otro recipiente vacío. El animal de tiro era uncido a una barra unida a un eje que transmitía el giro a través de ruedas dentadas al eje del

¹⁶ AGRICOLA, G. *Opus citi*, libro VI, pág. 168, fig. 2.4.1.

¹⁷ IBIDEM. *Opus citi*, libro VI, pág. 208, fig. 2.4.2.

tambor. El cambio de dirección en el giro del animal, originaba el descenso y elevación simultáneo de los dos ganchos en ambos sentidos. Si el tambor se situaba vertical, en su propio eje se fijaban los radios para uncir a los animales. Si era horizontal, la transmisión desde la toma de fuerza se hacía, pasando el movimiento del eje de las barras por medio de una rueda dentada, a un pequeño piñón en forma de linterna solidario al eje del tambor.

En el accionado por rueda hidráulica, el torno y la rueda estaban sobre el mismo eje en posición horizontal. El cambio de giro, se conseguía con una rueda hidráulica doble que recibía el agua por dos bocas diferentes mediante un cierre alternativo a mano, produciéndole el giro en ambos sentidos. Estas máquinas facilitaron la explotación, pues era posible por su rapidez, simultanear el proceso de elevación del mineral con el de extracción del agua, con el consiguiente ahorro de tiempo.

Con la mejor disposición de los atelajes de los animales de tiro se facilitó el transporte del mineral desde las bocaminas. Pero lo que benefició decisivamente al transporte fue la realización de caminos de rodadura, contruidos con tablones de madera o con piedra canteada. Esto disminuyó el esfuerzo que era necesario realizar en el desplazamiento de la carga, para superar las frecuentes ondulaciones del terreno y para evitar el barro acumulado en los alrededores. En Alemania se emplearon en la construcción de estos caminos vigas metálicas, lo que se considera como proceso precursor del camino de hierro de los futuros

ferrocarriles. En Transilvania se usaron en el siglo XVI vagonetas de minas, unas con perno para circular sobre tablones y otra de ruedas con reborde para circular sobre vigas de hierro¹⁸.

¹⁸ AGRICOLA, G. *Opus citi*, libro VI, pág. 147, fig. 2.4.3.

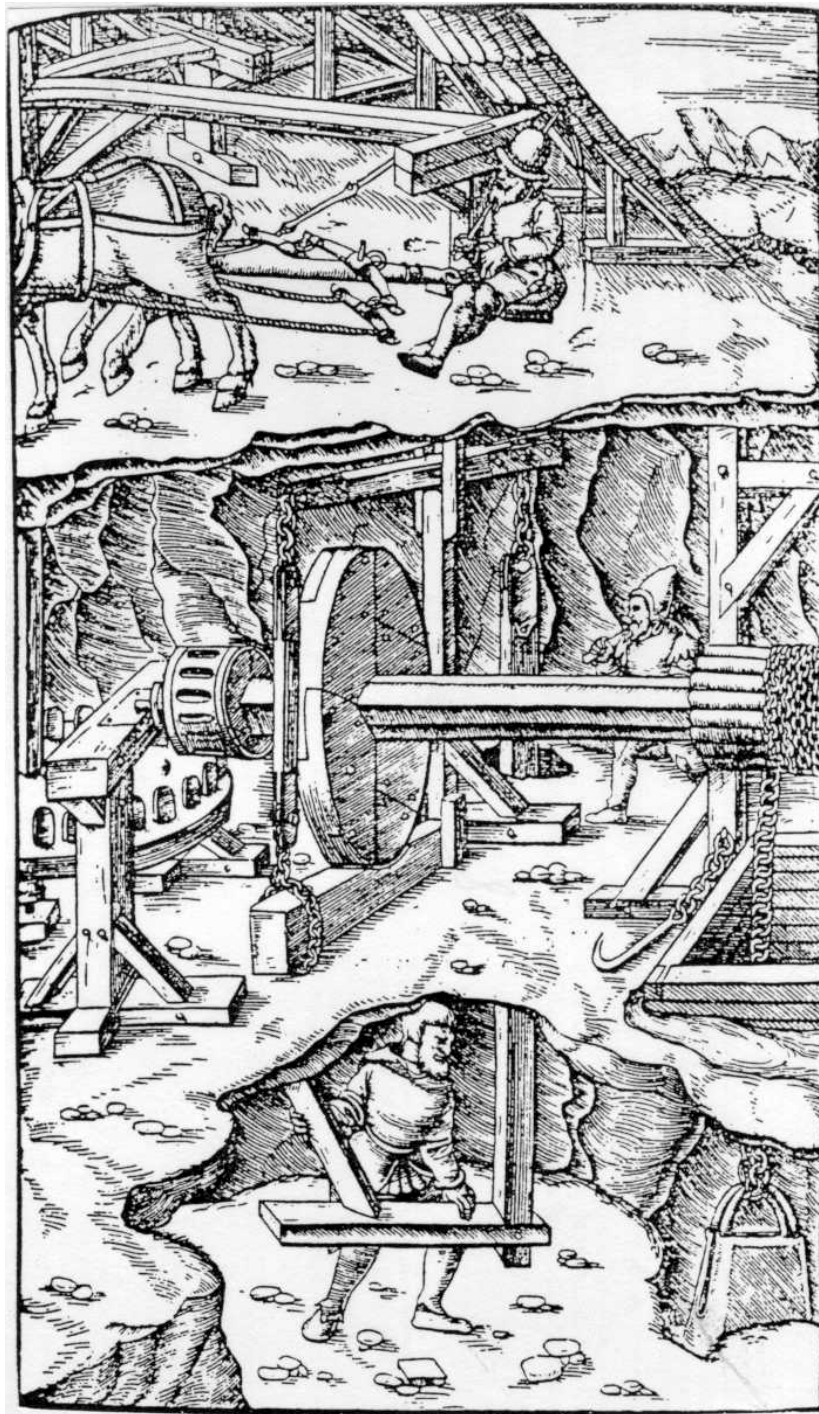


Figura-2.4.1. Malacate de sangre para minas.

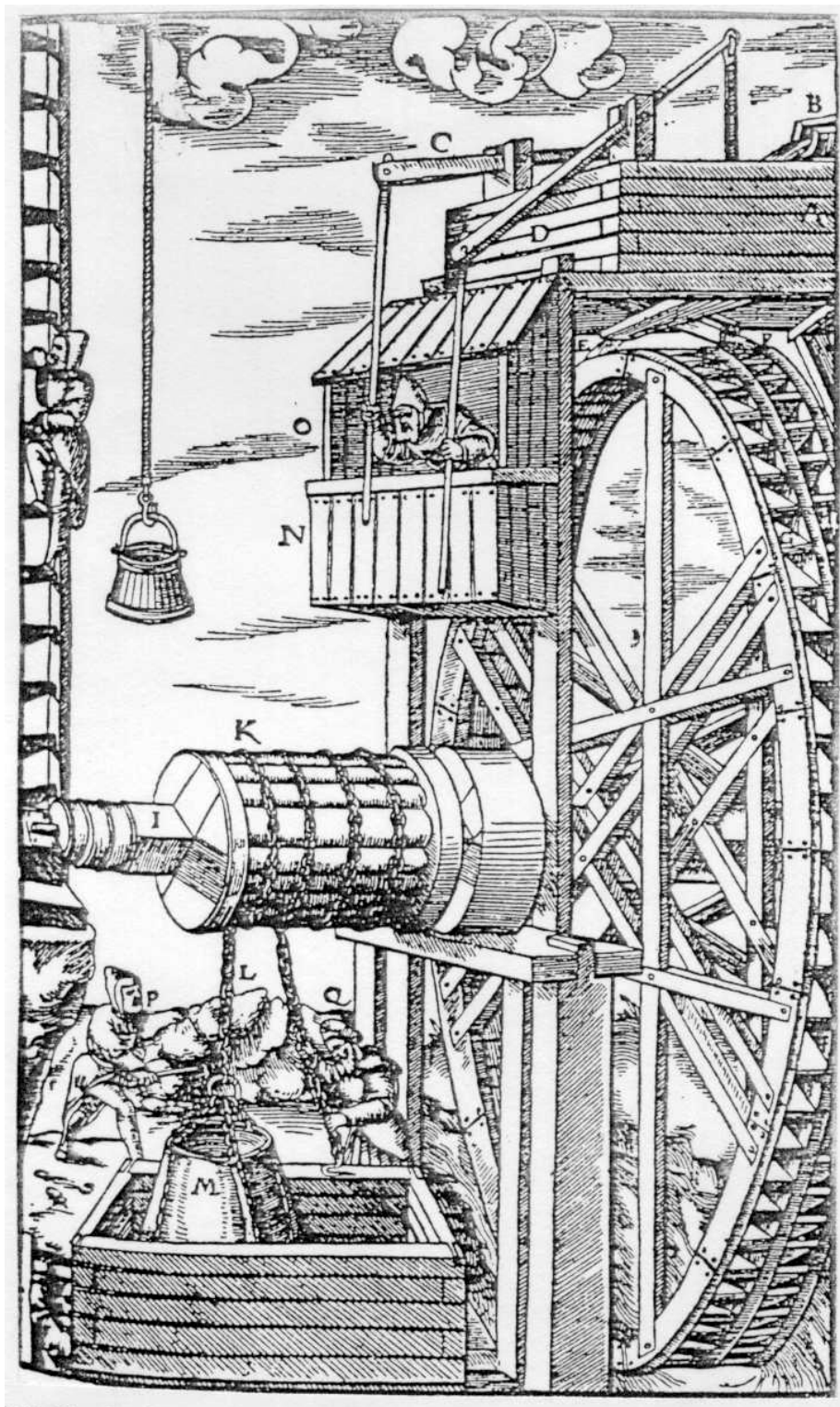


Figura-2.4.2. Rueda de arcabuces hidráulica y reversible para extracción de agua y material de minas.

La extracción del agua filtrada seguía siendo el reto mayor al que se enfrentaba la minería. Las profundidades aumentaban y a pesar de las mejores maquinarias, como el malacate antes descrito, el esfuerzo a realizar era demasiado para la potencia de las fuentes de energía empleadas. Los sistemas directos de extracción del agua, como el tornillo de Arquímedes, la bomba impelente o las norias, no podían hacerlo a grandes profundidades. Se diseñaron procedimientos para poner en serie estos

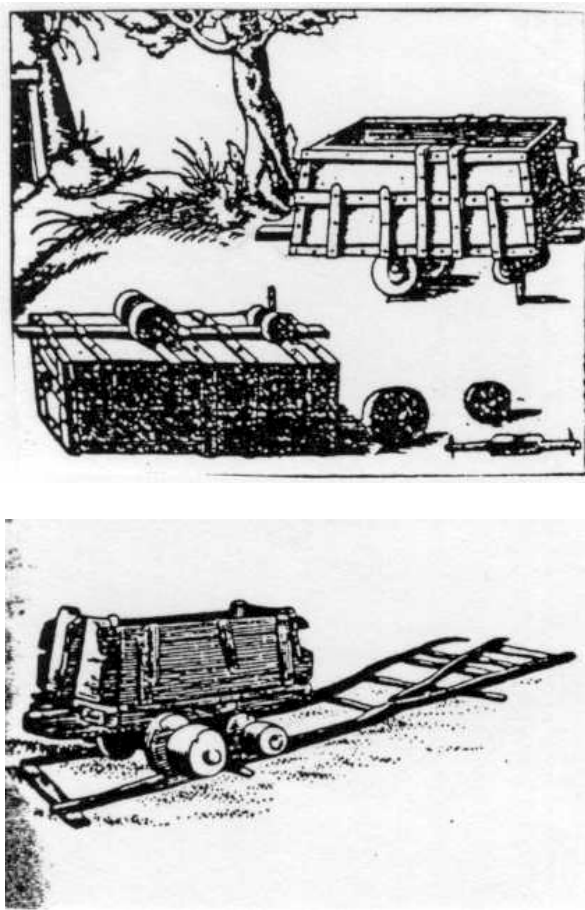
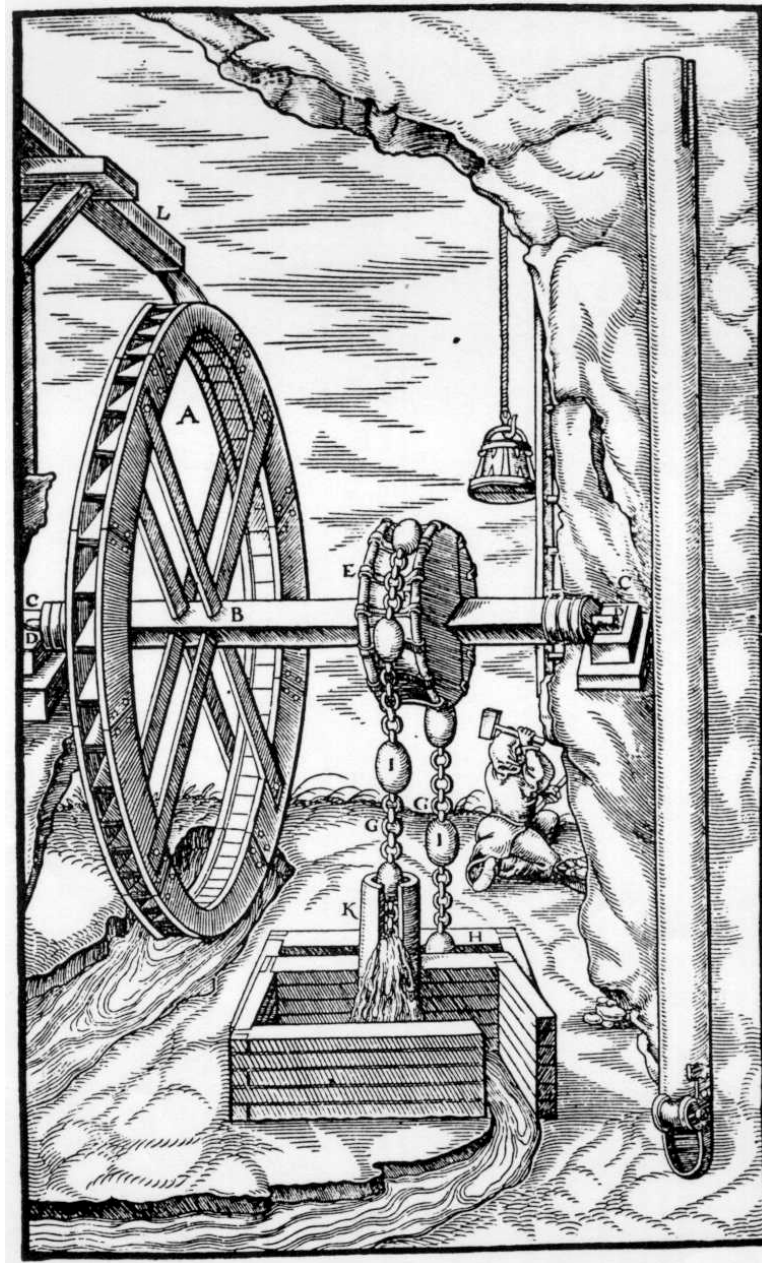


Figura-2.4.3. Vagonetas de minero con perno y con reborde en la rueda, Agrícola s. XVI.

mecanismos, lo que obligaba a trasladar al interior a los animales de tiro o a suministrar la energía a los mecanismos inferiores por medio de un eje común o de un sistema de cadenas. Estos procedimientos, aunque se encuentran descritos en diversas bibliografías, fueron contadas sus aplicaciones prácticas, debido al costo excesivo de las instalaciones y al relativo rendimiento que se obtenía. Solo la bomba impelente podía elevar el agua a grandes alturas, pero los materiales posibles de emplear, generalmente troncos de madera perforados y ensamblados unos a otros, no soportaban las presiones generadas. El problema se solucionó, en parte, disponiendo en serie dos o tres bombas que pasaban el agua extraída de unas a otra. Este mecanismo es analizado en el apartado 3.2 adjunto.

El mecanismo que en parte solucionó el problema de la falta de estanqueidad en las tuberías fue el “rag an chain”, bomba de cadena que consistía en un tubo de madera con refuerzo de bridas de hierro que se sujetaba a la pared del pozo, en cuyo interior una cadena soportaba los recipientes para el agua fabricados con pelo de caballo o piel, para evitar que se rompieran. El agua era elevada en el interior de los recipientes no ejerciendo presión contra las paredes del tubo, lo que permitía hacerlo a mayores alturas solo limitada por la potencia del medio utilizado para hacer girar la rueda. Elevó agua desde 20 metros de profundidad. Un procedimiento similar se realizó sustituyendo las bolsas por bolas de diámetro ajustado al del tubo de eleva-

ción integradas en una cadena de eslabones¹⁹. El agua ocupaba el espacio entre las bolas y era expulsada al final del tubo.



¹⁹ AGRICOLA, G. *Opus citi*, página 198. Figura 2.4.4.

Figura 2.4.4. Bomba de canjilones y bolas.

La solución se produjo a principios del siglo XVIII, con la aparición de la máquina de vapor de Newcomen, antes descrita y con la fabricación de tuberías de hierro resistentes y estancas.

El tratamiento de las menas en las factorías mineras, adoptó igualmente sistemas mecánicos en su proceso, haciendo la trituración del mineral por medio de bocartes accionados por energía hidráulica o de sangre. La máquina estaba formada por varias mazas, que podían girar en un eje común y eran elevadas por unas levas fijadas a un eje. Las levas en su giro empujaban las mazas que se elevaban hasta perder el contacto, momento en que caían golpeando y triturando al mineral. Con el mismo tipo de accionamiento se construyeron martinets de fragua con una o varias mazas²⁰.

²⁰ DIDEROT Y D'ALEMBERT. *La enciclopedia*. libro VI, pág. 42, fig. 2.4.5.

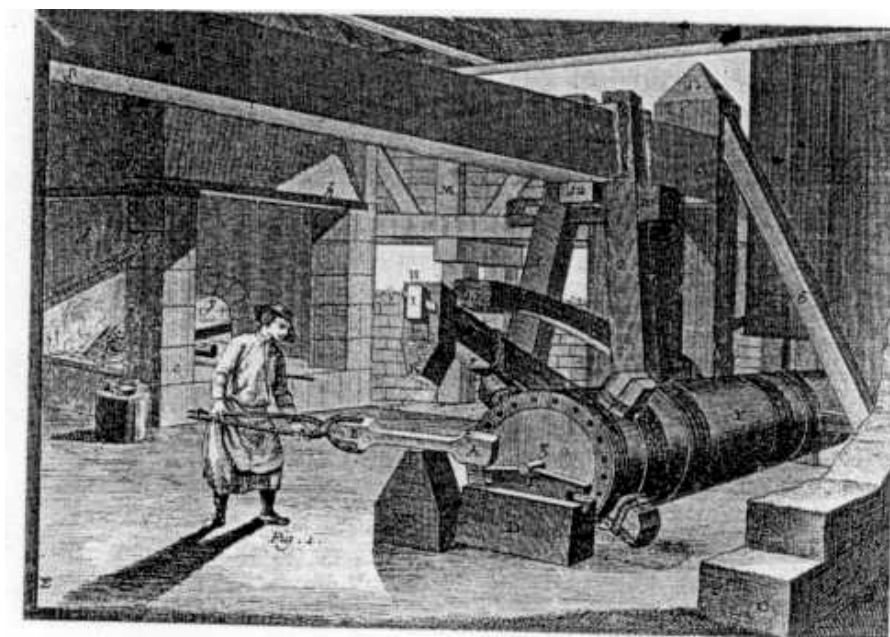


Figura- 2.4.5. Martinete de forja s. XVIII.

2.4.4.- Los transportes.

La navegación de altura, ya muy extendida, precisaba de otras formas de energía que la del viento o la sangre. En el siglo XVII se realizaron algunos intentos de aplicar mecanismos movidos por fuerza humana o animal, para accionar palas similares a remos o para mover ruedas semejantes a las hidráulicas. Blasco de Garay, realizó en el puerto de Málaga la prueba de un barco que con manivelas accionadas por hombres, movía los remos por medio de un mecanismo compuesto de barras y poleas. El resultado no fue bueno y no obtuvo ayuda para su perfeccionamiento.²¹

²¹ GUILLÉN ROBLES, F. *Historia de Málaga y su provincia*, cap. XV, pág. 45.

El aumento del transporte marítimo en mar abierto, aumentó la necesidad de nuevos y más eficaces sistemas de navegación. Hasta este siglo era posible conocer la posición en latitud a la que se encontraba un navío, observando con el sextante la posición de los astros, pero no era posible averiguar la longitud, dato necesario para averiguar con precisión la situación de la nave y, además, para conocer la duración de las travesías y valorar los fletes.

Debido al incremento del tráfico marítimo, la elaboración de planos cartográficos fue frecuente a partir del siglo XV. Bartolomé Díaz en 1486 cartografió en sus viajes la costa de Africa hasta el Cabo de Buena Esperanza. Cristóbal Colón en los suyos al Nuevo Mundo o Vasco de Gama navegando hacia la India en 1497, obtuvieron con la sola ayuda del cuadrante y la brújula, buenos planos de los mares surcados por ellos. Mapas universales derivados de esta cartografía marina se publicaron a principios del siglo XVI.

La imposibilidad del conocimiento de la longitud no permitía la perfección de los mapas confeccionados, pero marcaron rutas que sirvieron para que otros navegantes las siguieran en el cada vez más intenso tráfico comercial.

El empleo de las matemáticas en el trazado cartográfico, permitió la publicación de mapas de marear con puntos de referencia para fijar posiciones. En España Joan Martínez de la Escuela Mallorquina, realizó en el siglo XVI varios mapas de marear y portulanos, con referencias bastantes exactas respecto de

los paralelos y con trazado aproximado de los meridianos. Los primeros mapas realizados por Saxton a finales del siglo XVI y por Norden a comienzos del siglo XVII, fueron bastante exactos teniendo en cuenta los escasos medios empleados en su confección. Ellos ya consideraron como origen de ángulos de longitud al meridiano de Greenwich, dándole valor 0°.

La casa de contratación de Sevilla era considerada modelo de escuela de navegación desde el comienzo de los viajes americanos. En ella se confeccionaban mapas con los datos que tomaban los cartógrafos que acompañaban a las expediciones al nuevo mundo.

La triangulación se empleó en cartografía a partir del primer tercio del siglo XVI por los cartógrafos flamencos. Gemma Frisius es considerado el iniciador del procedimiento.

2.4.5.- El Textil.

La demanda de tejidos fue creciendo en todo este periodo y fue el motivo del gran avance que experimentó la maquinaria textil hasta principios del siglo XVIII. En el siglo XVI se inventaron la volandera para el hilado y el telar de cinta y ambos se fueron perfeccionando en corto periodo de tiempo con la experiencia adquirida.

La rapidez con que se trabajaba y la simplificación que representaba para el operario, hicieron temer una intensa disminución de la demanda de mano de obra, razón por la que estos

descubrimientos fueron desechados por los gobiernos e incluso algunos de ellos se hicieron desaparecer.

El continuo aumento de la demanda llevó a los fabricantes del Reino Unido a no poder atenderla. Esto originó la reaparición de los descubrimientos pretéritos, los cuales fueron autorizados con las mejoras introducidas.

El uso de la energía hidráulica como fuerza motriz en la maquinaria textil mejoró la producción, lo que ayudó, a principio del siglo XVII, a estabilizar los mercados sin encarecimiento de los productos. El textil se convirtió en el sector básico de la economía en las naciones industrializadas y fue el impulsor de la industria en todas ellas y muy principalmente en el Reino Unido.

2.4.6.- La Metalurgia.

Los procesos para la obtención de los metales eran conocidos en la inmensa mayoría de los estados, pero la obtención se reservó a los industrializados del centro y norte de Europa y el Reino Unido. Este país comenzó la producción de hierro fundido a mediados del siglo XVIII, con la construcción de hornos altos de gran poder calorífico. La obtención del hierro colado a bajo costo, permitió su utilización en diferentes procesos, principalmente en la construcción y en la fabricación de elementos de máquinas.

El hierro colado resultaba frágil y solo puede ser desbastado con herramientas de corte, y no puede ser empleado en

aquellos procesos que estén sometidos a presiones o golpes puntuales. Para la obtención de herramientas y elementos de forja, seguía utilizándose el hierro dulce obtenido a partir del pudelado.

2.4.7.- La medida del Tiempo.

Fue muy sobresaliente en esta época la evolución de los mecanismos de relojería, debido a que la medida del tiempo se hacía mas necesaria. Aparecieron los primeros relojes de cuerda en 1450 y se sabe de la existencia de algunos modelos portátiles contruidos a finales del siglo XV. El primer reloj de bolsillo se atribuye a Peter Pen, cerrajero de Nüremberg, que lo construyó a principio del siglo XVI. Se conoció como Huevo de Nüremberg.

El descubrimiento de las leyes del péndulo en el siglo XVII por Galileo y su aplicación a la medida del tiempo, hizo del reloj un mecanismo de precisión con base teórica. El péndulo movía el mecanismo de escape a intervalos iguales, haciendo posible que la caída de las pesas fuera controlada y el recorrido de la aguja proporcional al tiempo empleado en ella. A partir de la utilización del péndulo como mecanismo regulador surgieron otros para controlar el escape, siendo el áncora el más utilizado.

La relojería perfeccionó sus modelos de forma más rápida que cualquier otro mecanismo, denotando la importancia dada a la medida del tiempo.

La construcción del reloj exigió un grado de precisión no utilizado hasta entonces en ningún mecanismo y a pesar de que los primeros eran algo rudimentarios, según diversos autores contribuyó a la mejora de sistemas y al desarrollo de ciertos componentes, dando ideas para la realización de máquinas más perfectas. Los ejes, cojinetes, pivotamientos y ruedas dentadas de los relojes, se reprodujeron para ser empleados en los mecanismos.

Conocer la longitud de un lugar en la navegación era problema ya resuelto al nivel teórico, pero con los relojes existentes, debido a su inexactitud, no era posible saber la hora con la necesaria precisión en el lugar que la nave se encontraba, con relación a la del punto fijo considerado de longitud 0°. Aún conociendo el péndulo y su regularidad, no era posible su utilización en un barco por la inestabilidad y por las diferencias de temperatura que en sus singladuras encontraba.

Para solucionarlo la marina inglesa convocó un concurso dotado con 10.000 ó 20.000 libras, según la exactitud lograda, para premiar a aquel que desarrollara un reloj, lo suficientemente exacto para ser útil a la navegación, de modo que no variara con el movimiento y la temperatura. En 1759 Harrison ganó el concurso construyendo un cronómetro, -así se llamó el nuevo reloj-, que poseía las características impuestas por la normativa del concurso. El meridiano tomado como origen fue el que pasa por la ciudad inglesa de Greenwich.

2.4.8.- La Imprenta.

Las tareas de la impresión posteriores a la confección de la plancha se fueron perfeccionando acelerándose la producción del material impreso. Sin embargo la preparación de la plancha mediante la disposición manual de los tipos sobre ella, ha permanecido prácticamente invariable hasta la aparición a principio de este siglo de las rápidas linotipias, máquinas que funden los caracteres en líneas completas de forma automática.

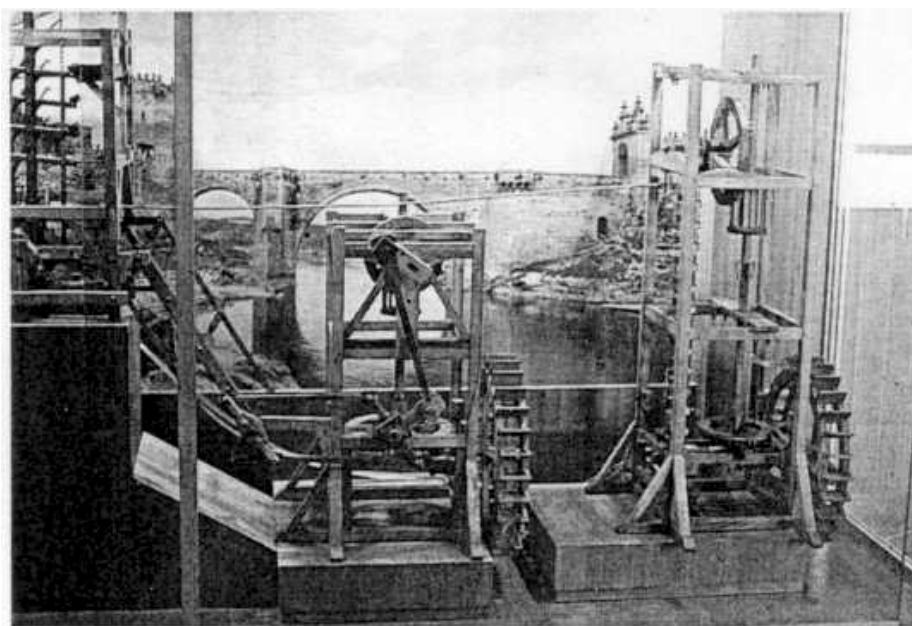
El efecto beneficioso que se produjo con la invención de la imprenta continuó a lo largo del periodo, surgiendo por la facilidad que representaba realizarlos los primeros noticieros de publicación periódica.

2.4.9.- Los mecanismos.

Durante la edad moderna aparecieron una serie de máquinas complejas formadas por la combinación de mecanismos y sistemas ya existentes que lograban con su unión nuevos objetivos. Ejemplo de ello es el sistema de abastecimiento a las grandes ciudades de centro de Europa iniciados a principios del siglo XVI, en el que se emplearon norias y bombas. Juanelo Turriano diseñó para Toledo un sistema de abastecimiento de agua para la población, -ignorado durante bastante tiempo-, del que recientemente se ha realizado una maqueta basada en los datos

referidos en la obra del inventor²². El alemán Peter Morice diseñó y construyó en 1582 para Londres, un sistema de abastecimiento de agua, utilizando para él varias bombas impelente movidas con rueda hidráulica.

El suministro de agua a las poblaciones, se realizó utilizando los procedimientos que se emplearon en la agricultura para el regadío y en las minas para el achique del agua de filtración, alimentando con ellos a las redes de suministro. La altura de elevación era menor en la mayoría de los casos y, de no ser así, el empleo de sistemas en serie solucionaba el problema sin grandes inconvenientes de espacio ni costos excesivos, al estar instalados a la intemperie y disponer de espacio suficiente.



²² REPRESENTACION GRÁFICA en *Diccionario Enciclopédico Espasa*, Fig. 2.4.6.

Figura 2.4.6. Maqueta, según Ladislao Reti, del artificio que Juanelo Turriano construyó en Toledo para abastecer de agua a la ciudad.

Hacia el siglo XV, se concibieron dos mecanismos, derivados de otros anteriores, con los que se produjo un gran avance en el aprovechamiento de las tres fuerzas motrices utilizadas hasta el momento, sangre, agua y aire; fueron el torno y el mecanismo biela - manivela. El primero es una máquina herramienta que permite la realización de componentes de uso muy frecuente, (elementos de sección circular, taladros o con tallado en hélice), contruidos mediante el giro del trozo de materia base entre dos puntos y una herramienta de corte con dos grados de libertad perpendicular y paralelo al eje de giro. El mecanismo biela-manivela convierte el movimiento rectilíneo alternativo en otro circular y continuo y es a la vez reversible. Aplicado a una máquina permite al operario moverla, dejándole las manos libres para manipular la pieza. Se aplicó al torno, a mecanismos de desbaste y pulido y a toda máquina que precisara cambiar un movimiento rectilíneo alternativo, que podía originarse con el empuje del pie, en otro circular, o éste en aquel.

La aplicación del mecanismo biela-manivela al torno, sustituyó muy eficazmente al accionamiento primitivo mediante arco y cuerda con movimiento de vaivén (ver figura 2.3.7), obteniéndose mayor velocidad y rendimiento.

Para la carga y descarga se utilizaban diversos procedimientos según el peso a mover, pero siempre suministrando la potencia el hombre o los animales. Los tornos, poleas simples y

múltiples, eran movidos por el hombre y los malacates para la elevación de grandes pesos se movían con fuerza animal o ruedas de hombres.

En estos primeros pasos de la industrialización en Europa la energía se obtenía de las fuentes tradicionales el agua, el viento y la sangre, y se usaba con mayor frecuencia en los mecanismos la cadena cinemática ya establecida por los teóricos, de tornillo, rueda dentada, leva, trinquete y polea, agregándose a ellos el mencionado mecanismo combinado biela - manivela. Pero la energía suministrada por las fuentes existentes, limitaba su eficacia. Era necesario obtenerla mediante un sistema continuo, no sometido a las inclemencias del tiempo e independiente de la climatología

2.5.- LA EDAD CONTEMPORÁNEA.

La evolución de los mecanismos en este periodo no tiene ninguna posible comparación con la habida anteriormente. La máquina de vapor produjo en la economía y en la industria un efecto dinamizador en todos los procedimientos y los mecanismos en general. Incluso la agricultura, que en los últimos años no introdujo mejoras sobresalientes, las consiguió con nuevas máquinas y con la utilización de nuevos cultivos potenciados con fertilizantes y protectores contra las plagas.

No desaparecieron los antiguos sistemas de producción de la energía, aún existen, pero evolucionaron y se modernizaron incluso los más elementales.

La máquina en sus comienzos. Diseño de un modelo virtual semejante y funcional.

Su influencia afectó incluso al sistema social. La creación de las grandes empresas, generadoras de fuertes beneficios y grandes fortunas familiares, no llevó consigo un cambio paralelo en el régimen social aplicado desde antiguo en ellas, provocando los primeros movimientos de lucha obrera.

Las naciones más industrializadas aumentaron sus diferencias con las menos preparadas, concentrándose todo el poder económico en unas pocas de ellas. Entre todas destacó con diferencia el Reino Unido.

La proximidad de la fecha y el aumento de la conciencia historiográfica, principalmente, en los países industrializados, ha permitido conocer con bastante precisión la evolución de la tecnología en este periodo de tiempo. Se puede asegurar que todas las máquinas que se construyeron en este periodo se han descrito y representado y gran número de ellas o sus maquetas existen en museos específicos de la tecnología o de los propios fabricantes.

Por la razón antes apuntada un breve resumen de la tecnología en este periodo histórico, sería necesariamente demasiado extenso. Y dado que nuestro estudio pretende diseñar una imagen funcional de aquellos mecanismos en cuya descripción o representación se observe, por nuestra parte, algún tipo de deficiencia, no tendríamos posibilidad de hacerlo de ninguno aparecido durante estos años. Por esta razón no se incluye en este breve resumen.

La máquina en sus comienzos. Diseño de un modelo virtual semejante y funcional.

Si queremos resaltar que el hombre ha sido el artífice siempre presente en la historia de las máquinas y de los mecanismos, demostrando este hecho la importancia que han tenido en el desarrollo y mejora de la civilización. Quizás superior a la de cualquier otro proceso.

La máquina en sus comienzos. Diseño de un modelo virtual semejante y funcional.

3.- ESTUDIO DE LAS MÁQUINAS SELECCIONADAS.

La primera Máquina elegida es una sierra automática accionada por una rueda hidráulica que se representa en los cuadernos de Villard de Honnecourt, realizados por este autor en el siglo XIII. La segunda es una bomba con el mismo tipo de accionamiento, para extracción del agua de las minas que aparece dibujada en el libro VI de la obra escrita a finales del siglo XV por George Agricola denominada "De re metallica".

El proceso de análisis seguido es igual en ambos casos y contiene ocho apartados que pretenden establecer una forma de análisis secuencial, válido para cualquier estudio en el que se desee determinar una de las diversas forma que podría haber tenido la máquina elegida para funcionar. El orden seguido es:

1.- Se describe en primer lugar el antecedente histórico que examina las razones que motivaron la aparición de este tipo de máquinas y las descripciones y comentarios que de ellas hacen sus propios autores y los posteriores tratadistas que estudian estas obras.

2.- Posteriormente se analiza y describe el funcionamiento que se deduce del dibujo original, comentando brevemente lo que los autores e historiadores puedan haber descrito de este tema.

3.- Derivado del estudio anterior, se explican en esta secuencia las deficiencias observadas en el dibujo y en la descripción de la obra, si las hubiere, que serían motivo de un inco-

recto funcionamiento, exponiéndose a continuación las soluciones propuestas para corregirlas, siempre tratando de mantener el aspecto más semejante posible con el modelo original.

4.- En esta fase se realiza el estudio analítico y gráfico de aquellos defectos que, para una mejor explicación, es recomendable la deducción teórica.

5.- Con los datos obtenidos en los análisis anteriores se procede a la descripción del mecanismo, indicando las motivaciones que han llevado a la elección de la forma propuesta y demás aspectos del estudio, como puede ser dar opciones a otras soluciones diferentes.

6.- En esta sección del estudio se diseñan los diferentes elementos que precisa la máquina, realizándose los dibujos en dos dimensiones. Las medidas, básicamente, son deducidas de los dibujos o de las descripciones, actuando siempre con el criterio de semejanza con el original. Los elementos derivados se obtienen por procedimiento gráfico y analítico, utilizando los sistemas ya existentes en la época de aparición de la máquina.

7.- En los casos que sea posible y se crea conveniente, se realiza un estudio de la capacidad de la máquina y de la potencia absorbida, con idea de justificar las dimensiones de los elementos esenciales, comprobando que se aproximan a las que se supone debían de tener.

8.- En la última fase del estudio se representan en tres dimensiones los diversos componentes y el aspecto de la máquina

en conjunto. Esta fase del estudio es necesaria para realizar una imagen virtual de la máquina en la que se pueda observar dinámicamente su correcto funcionamiento. La visualización debe permitir ser observada desde diferentes puntos de vista, para realizar un análisis preciso de los componentes dotados de movimiento.

Como se ha descrito en la Introducción, con este procedimiento se pretende en la sierra, diseñar un primer modelo similar al del dibujo con posibilidad de funcionar y otro evolucionado que derivado del anterior incorpora algunas mejoras que hacen el trabajo de la máquina más perfecto.

En la segunda máquina, se han diseñado también dos modelos basados en el mismo procedimiento. Ambos solucionan los defectos de funcionamiento y definen dos formas diferentes de interpretar el dibujo y la descripción que de él hace el autor.

3.1.--LA SIERRA HIDRAULICA.

Este estudio de los mecanismos antiguos comienza con la máquina que aparece representada, de una forma muy particular, en los cuadernos de Villard de Honnecourt que, a pesar de la forma tan peculiar de representación, define con claridad el uso a que se destina y su funcionamiento. Es una máquina para serrar automática que pone de manifiesto la inquietud que existía en la época por conseguir sistemas y procedimientos que aliviaran el trabajo duro y continuado y permitiera producir con rapidez.

3.1.1.-Antecedentes históricos.

La madera, hasta época muy reciente, ha sido el material usado en la práctica totalidad de los objetos producidos para uso humano. Era empleada en la fabricación de mecanismos, útiles y herramientas destinados a todos los usos.

Esta utilización tan generalizada obligaba a una obtención continua del producto; la tala se realizaba manualmente y no presentaba obstáculos significativos, de hecho así se hace en la actualidad, salvo en las grandes explotaciones. Sin embargo la preparación posterior que se ejecuta una vez curado y bien seco el tronco, sí es una operación que exige de mas tiempo para realizarla, y sobre todo los cortes, que es necesario hacer un número determinado de ellos variando el espesor y en el sentido que se obtenga el mejor aprovechamiento, siempre dependiendo

del fin a que se destine.

En todos los tiempos, e incluso en la actualidad, todo era aprovechado, por lo cual era preciso efectuar una gran cantidad de tajos que empleando procedimientos manuales, necesitaban de un numeroso contingente humano y de bastante tiempo, sin duda, el factor más negativo de cara a la productividad.

La demanda del producto fue la principal causa de que el afán de inventar surgido en el siglo XIII, se planteara aliviar el problema que presentaba el tratamiento y la preparación. Es de suponer que en la mente de los que comerciaban con ella, estuviera facilitar el trabajo y obtener rendimientos mejores en la producción, dado que era la materia prima mas utilizada. Además la demanda crecía conforme lo hacían las poblaciones y los pueblos mejoraban el nivel de vida.

En los cuadernos de V. de Honnecourt, describe el autor de este mecanismo solamente lo siguiente:

"De este modo se hace una sierra que sierre por sí sola"¹.

Se comenta en la obra mencionada, que es la primera máquina de este tipo que se representa y que la asociación Villard de Honnecourt, fundada en 1983 (dedicada a dar a conocer a los franceses a través de los cuadernos, la revolución industrial de la Edad Media), construyó en el lugar que ocupó la iglesia de Honnecourt, la sierra hidráulica que él mismo dibujó en su cuaderno y añade:

¹ ERLANDE-BRANDEMBURG y otros. *Vilar de Honnecourt. Cuadernos*, pág. 35.

"La sierra mecánica es la primera máquina automática de dos tiempos: al movimiento circular de las ruedas, que crea un movimiento alternativo capaz de serrar, hay que añadir el avance automático de la madera en la sierra. Lassus describe así el mecanismo:"

"Un arroyo, cuyas ondas están indicadas arriba a la izquierda, hace mover una rueda de álabes oblicuos sobre un eje que posee una rueda dentada y cuatro levas. La rueda dentada hace avanzar la pieza de madera a serrar, mantenida entre cuatro guías que impiden que se desvíe. Las levas apoyan sobre uno de los brazos articulados sujetos por abajo a la sierra vertical, que en lo alto está fija al extremo de una estaca flexible. Al apoyarse sobre el brazo de articulación, la leva hace descender la sierra, que curva la estaca y vuelve a subir en virtud de la flexibilidad de ésta, cuando la leva se detiene. Una sola cosa ha sido omitida por el dibujante, me refiero al eje de los pequeños brazos de la articulación, eje necesario para que los grandes brazos puedan moverse en torno al segundo eje que los comunica con los pequeños y, además, para que la sierra descienda bien verticalmente. Destaquemos por otra parte, la oblicuidad de los álabes de la rueda hidráulica que deben disponerse como los cangilones de una noria, aunque el dibujante se haya equivocado en el sentido que les da."

"Cuando el arquitecto Patrice de Vericourt estableció, con la colaboración de Roland Bechmann, los planos de la máquina que se construyó en la aldea de Honnecourt, fue preciso interpretar y adaptar algunos detalles del dibujo de Villard, sobre todo el perfil de las levas."²

Actualmente "La Asociación Villard de Honnecourt para el estudio interdisciplinar de la tecnología, ciencia y arte medieval", se agrupa en AVISTA, fundada en 1985 con el asesoramiento de Jean Gimpel y Lynn White Jr. y edita una revista semestral con artículos, notas, interrogantes y sugerencias sobre

los aparecidos en otras publicaciones. Además la asociación realiza congresos internacionales de Estudios Medievales, en los que se expone la evolución de la tecnología y su influencia en la historia. El 35º Congreso se celebrará en Michigan, EE.UU. del 4 al 7 de mayo del 2000.

Una referencia a la sierra fue escrita y publicada en 1985³. En ella los autores analizan el mecanismo y su funcionamiento, junto con las razones históricas que impulsaron su realización. Estudian los defectos y la evolución que ha tenido este mecanismo hasta nuestros días, resaltando la duración que han tenido las soluciones dadas por Francesco de Giorgio, algunas de las cuales han perdurado hasta nuestros días, sin duda, comentan, por lo económico de su mantenimiento y por el permanente caudal de agua en la zona.

No obstante la solución aportada por los autores para el conjunto deformable no nos parece adecuada, pues dota al polígono de cinco puntos de giro lo cual produce una deformación irregular que se vería afectada por el empuje de la sierra. En el análisis posterior insistiremos en estas apreciaciones.

Acompañan al artículo una interesante bibliografía sobre la Historia de la Tecnología.

La importancia de la obra de V. de Honnecourt es patente y los trabajos realizados sobre ella, demuestran lo significativo de

² ERLANDER- BRANDEMBURG y otros. *Opus citatur*, pág. 36.

³ ADAM, J. P. y otro. *La scie hydraulique de V. de Honnecourt et sa place dans l'histoire des techniques*. Bulletin monumental, 1985, pág. 319.

sus relatos y su capacidad como diseñador e inventor que dio a conocer las técnicas aparentemente utilizadas por él en los campos diversos de la Arquitectura, el arte y las ciencias. Existen en la actualidad más de cuarenta publicaciones relacionadas con su obra entre ediciones de texto y temas monográficos.

En “El Mosela”, obra de Décimo Magno Ausonio, se menciona una posible sierra hidráulica que según opinión de D. L. Simms ⁴, pudiera haber existido en el siglo IV, aunque esta mención la hace este último autor refiriéndose a la autenticidad del texto de Ausonio, no a la del mecanismo; en éste, en el mecanismo, se basa para considerar a Ausonio como autor de esta parte de la obra, pues se pensó por algunos investigadores que podía haber sido añadida en la Edad Media. Dice así la traducción de la obra de Ausonio:

"A ti el rápido Celbis, a ti Erubris, renombrado por su mármol, tratan de lamerte cuanto antes con sus aguas sumisas el Celbis, famosos por sus magníficos peces, aquel que, dando vueltas a las piedras molineras con rápido movimiento y arrastrando las sierras chirriantes al través de los mármoles pulidos, escucha desde ambas orillas los ruidos incesantes."⁵

La semejanza de ambos mecanismos, no es posible averiguarla, pero lo que parece, según los estudios de Simms y otros escritos, es que la máquina existió en el siglo IV.

⁴ SIMMS, D. L. *Water-driven saws, Ausonius, and the another authenticity of the Mosela*, pág. 635-643.

⁵ AUXONIO, D.M. *Mosela* 9.- Obras I y II.

La máquina que figura en los cuadernos es, por su apariencia, más propia de los tiempos de la descripción de Auxonio que de aquellos en los que fue dibujada por V. de Honnecourt en el siglo XIII. Los dibujos de esta última época, ya definían con mejor precisión los rasgos externos y se empleaban unos sistemas de representación que describían con mayor precisión el aspecto real del objeto, incluso los que aparecen ilustrados en códices y salterios de este mismo siglo.

Algunos de los dibujos de máquinas y otros artilugios de V. de Honnecourt, presentan esa forma algo surrealista que se observa en la sierra; parece ser su intención demostrar el fin a que se destina pero sin precisar detalles ni formas constructivas. No son así representados los relativos a la construcción de iglesias y catedrales que si quedan bien representados.

No se pretende analizar las formas de representación que en la época se realizaban de las que ya el Catedrático F. Villar del Fresno escribió, entre otras consideraciones, lo siguiente:

"Es evidente, por un lado que cada época de arte tiene su propia fisonomía, por ello, para no estar expuestos a equivocaciones, no se puede comparar una con otra sin meterse en el ambiente de los periodos a estudiar y no tratar de medir éstos con el mismo rasero pues los métodos que el hombre ha ideado para representar en perspectiva son tan variados como las sociedades en que ellos han vivido. No hay una sola perspectiva, la elección de una determinada depende de lo que el dibujante quiera y como quiera representarlo dada la imposibilidad en que suele encontrarse de mostrarlo todo."⁶

⁶ VILLAR DEL FRESNO, R. y otros. *El ayer y hoy del dibujo técnico*, pág. 4.

Por esto, como se manifiesta en la introducción, no es idea de este estudio analizar las formas de representación, sino contemplar el dibujo tal y como está en el grabado y a partir de él, realizar un modelo derivado con rasgos similares y que pueda realizar el trabajo sin inconvenientes, trabajo que, desde nuestro punto de vista, no podría hacer la máquina representada en el dibujo original.

Se proyecta repetir lo que se realizaría en la villa de Honnecourt, según se comenta en la obra antes mencionada de Erlande-Brandenburg, construir una máquina tomada del dibujo que realmente funcionara. En este caso se realiza una imagen virtual dotada de animación para observar el movimiento que el modelo propuesto tendría.

La forma es una de las posibles sin pretender que sea con exactitud la que tuvo la máquina original, pero si es probable que fuera próxima a la de ella por su parecido aspecto y por la posibilidad que tiene de funcionar.

Se han realizado dos diseños, el primero, denominado diseño 1, es derivado directamente del dibujo original añadiéndole los necesarios elementos para que sea funcional; el segundo, o diseño 2, es la máquina algo mejorada que elimina el inconveniente del anterior referente al desplazamiento transversal de la sierra respecto de sus ejes.

3.1.2.- Análisis del funcionamiento.

Como se aprecia en la fig. 3.1.1, el autor no sitúa los componentes en el espacio que les corresponde siguiendo la forma de representación plana del siglo que se supone realizado y la forma particular de presentación de los dibujos que el autor utiliza en buena parte de sus documentos. No obstante el funcionamiento de la máquina puede deducirse del dibujo con facilidad, como al principio se dijo.

El conjunto lo mueve la rueda hidráulica que aparece en la parte superior, de la que anteriormente se ha transcrito cierta deficiencia referida por Lassus en su obra. Acciona ésta el eje común que contiene la rueda intermedia para mover la mesa y los largueros calados a 90° que, a modo de levas, actúan sobre el pentágono articulado produciendo el movimiento vertical descendente de la sierra. El ascendente lo origina la rama que actuando a modo de ballesta hace que recupere su posición primitiva.

El avance de la pieza a serrar que se sustenta en los soportes con forma de “U” representados en planta, lo produce la rueda intermedia provista de puntas en el contorno que se clavan en el propio madero a cortar, arrastrándolo con su giro. La imagen no define con claridad la posición de las puntas y sobre que lado de la pieza actúa, pero si deja bien patente el trabajo que ha de realizar.

Los componentes rudamente dibujados, lo están en la forma que con más claridad expresan su función. La sujeción de la ballesta al suelo mediante un pequeño tronco clavado al que se amarra su extremo inferior, expresa la necesidad de que ha de ser un punto fijo. La horquilla obtenida de una rama e igualmente clavada al suelo, indica que ha de ser un punto de apoyo libre necesario para la flexión de la ballesta y así recuperar la posición primitiva de la sierra. La placa dibujada al extremo del eje clarifica la base sobre la cual gira, impidiendo que se clave en el suelo por efecto del movimiento. Los puntos marcados en el elemento deformable dan idea de los grados de libertad que ha de tener para poder girar, mientras que los extremos fijos se clavan en el suelo.

Todo ello es más que una ilustración formal de la máquina, una manera de expresar, sin palabras, el funcionamiento, los elementos indispensables, la manera de instalarlos y, en conjunto, el aspecto externo de la máquina. Da la sensación de que desea definir el mecanismo, pero no una figura determinada de él que podría variar conforme se fuera construyendo y del resultado de su funcionamiento. No en vano los mecanismos se construían sobre una base empírica sin apenas ayuda teórica.

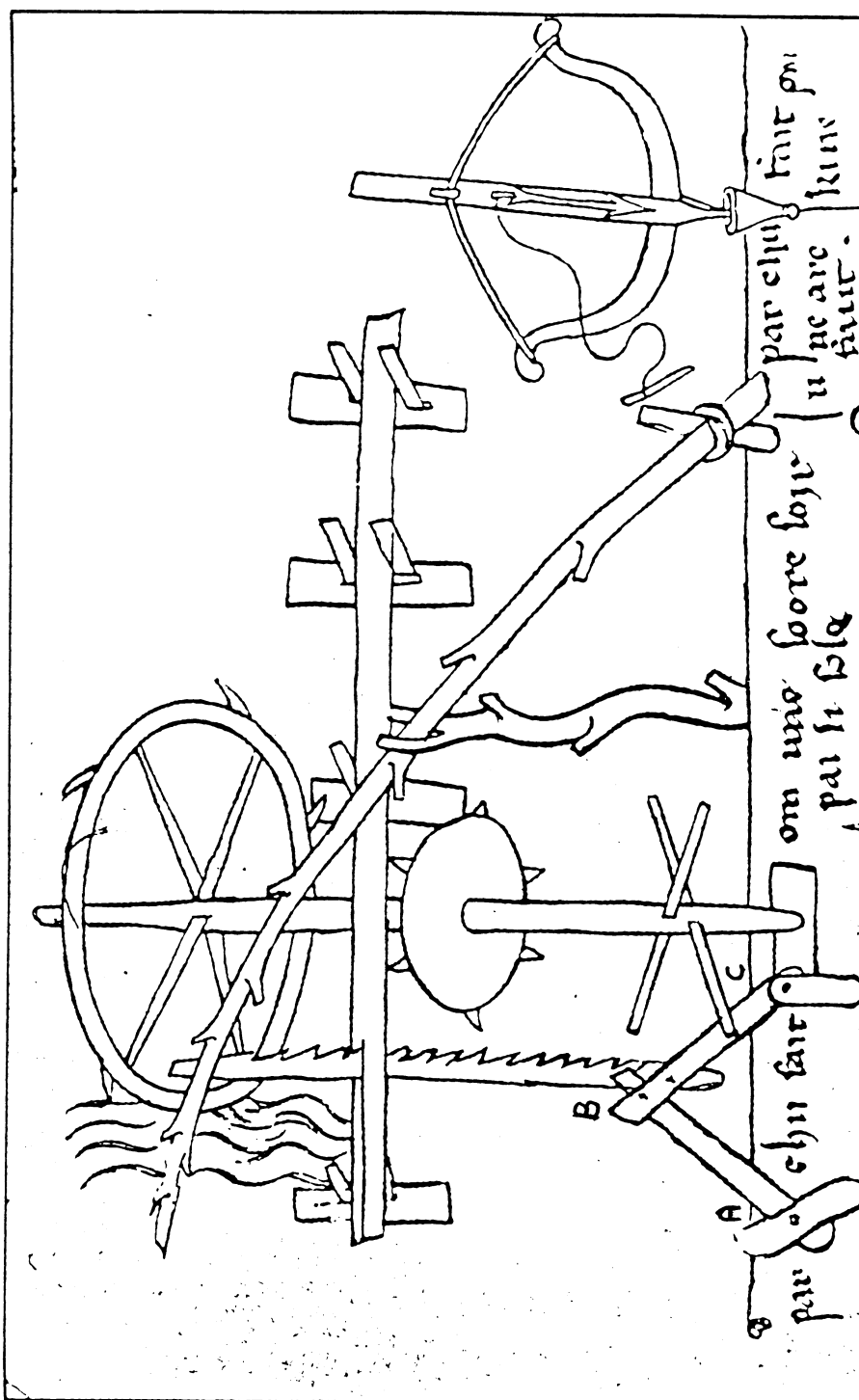


Figura 3.1.1. Sierra accionada por una rueda hidráulica.

3.1.3.- Deficiencias observadas y soluciones propuestas.

Independientemente de la singularidad de la representación que, como antes se menciona, no es objeto de este estudio, se observan en el dibujo ciertas deficiencias que harían imposible el funcionamiento, a las cuales es de suponer que se refieren los autores de la obra antes mencionada, cuando comentan que han de “interpretar y adaptar algunos detalles del dibujo de Villard”. Estas son:

a).- El conjunto móvil ABC para que sea deformable necesita de cuatro puntos de giro, no siéndolo para los tres que muestra el dibujo. Caso de estar provistos de giro los cinco vértices, la deformación no sería regular sino aleatoria, solución que presentan Adam y Varéne en su artículo y que el empuje del madero haría desplazarse en sentido contrario al corte, escapándose del radio de empuje sin haber tenido la sierra suficiente desplazamiento vertical.

Otra interpretación del movimiento sería suponer que girara en -A- y -C-, siendo -B- una unión rígida, interpretación del dibujo dada por un desconocedor de las normas de representación con buena visión espacial y que realizó una maqueta de su idea cuya foto se incluye en la figura 3.1.2. La representación del dibujo original realizada sin norma, es suficientemente clarificadora en la actualidad para que alguien con buena visión espacial y sin conocimientos de dibujo, la interprete en la for-

ma que, para nosotros, la pensó construir el autor.

- En ambos diseños se propone hacerlo móvil con giro en -A- y -C- y utilizando el -B- como punto rígido de unión con la sierra. La figura 3.1.3 muestra la disposición en perspectiva.

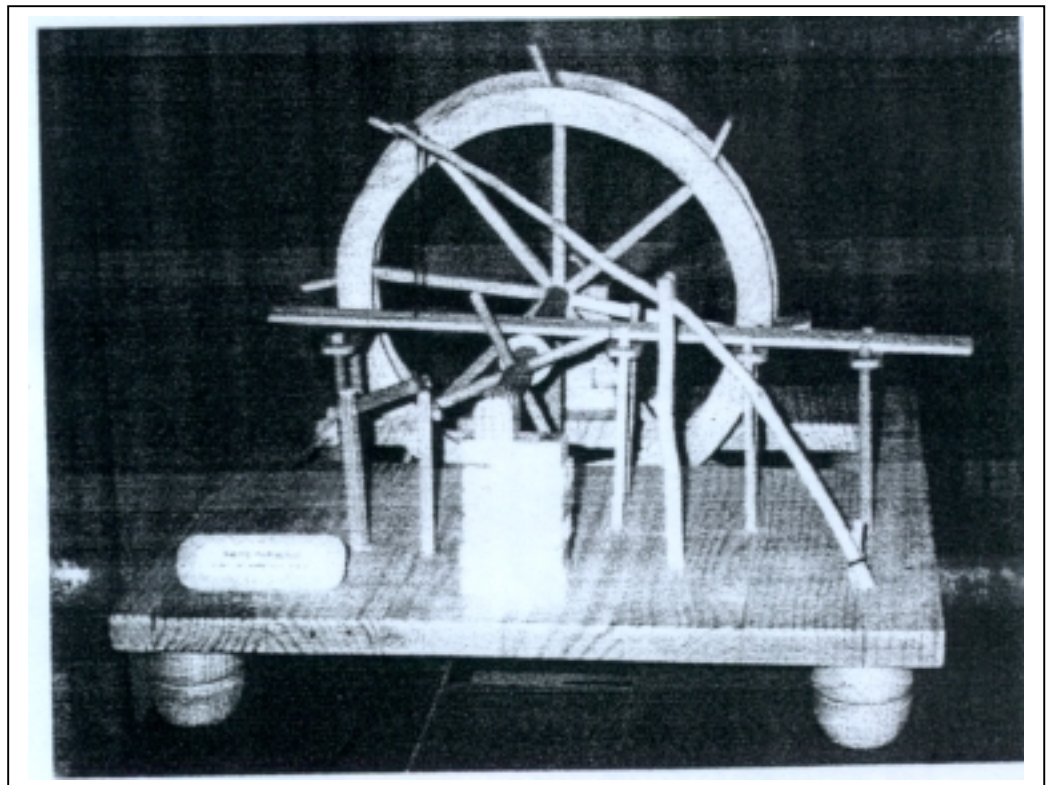


Figura 3.1.2.

b).- Los radios insertados en el eje han de girar en el sentido de las agujas del reloj para empujar al conjunto deformable. Supuesto el giro en -A- y -C-, el empuje hacia abajo de los radios a la barra -BC- que sujeta el extremo de la sierra, produce un desplazamiento en ésta perpendicular al papel que impediría el movimiento.

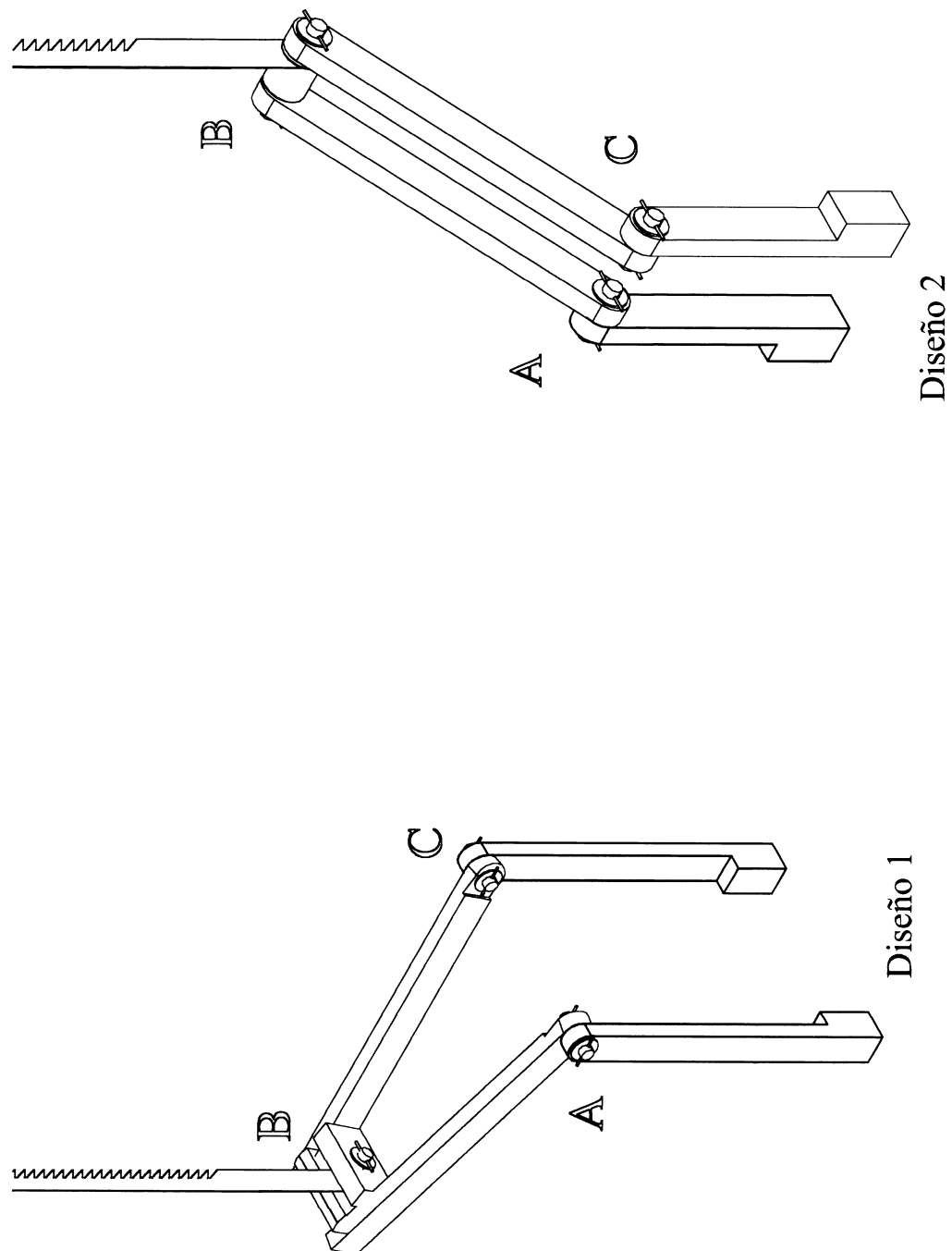


Figura 3.1.3.

Igual desplazamiento transversal genera la flexión de la ballesta, además de moverse hacia la izquierda del dibujo, separándose de la pieza.

- En el diseño 1 se ha situado en -B- un eje perpendicular al plano del dibujo para la sujeción de la sierra que permite que ésta se mantenga en el plano de corte al poder deslizarse por él (figura 3.1.4). Igualmente, un eje colocado en la misma posición y con el mismo fin en el extremo de la ballesta, deja a la sierra en el plano de corte, como se indica en la figura 3.1.5.
- En el diseño 2 el conjunto móvil se ha situado bajo la pieza de forma que el extremo -B- describe en su movimiento un plano paralelo al de corte y con avance hacia la pieza, no produciéndose desplazamiento transversal.
- Para evitar que la ballesta separe la sierra de la pieza ha de emplazarse en sentido contrario al representado, de modo que la sujeción al tronco se sitúe a la izquierda del dibujo. El recorrido de la sierra en esta posición del soporte sigue el arco de la ballesta y avanza hacia la pieza. La representación de Adam y Varéne dejan la percha de retorno, (así de nominan al tronco) en el mismo lado que el dibujo representa.

c).- En la marcha ascendente hacia la posición de reposo, al contrario que ocurre en el punto b) con el descenso, se

produce el acercamiento de la sierra a la pieza con movimiento en la dirección contraria al sentido del corte de los dientes y con avance hacia la pieza, lo que impediría el retorno del conjunto a la posición inicial por el rozamiento que se originaría.

- La forma descrita en b) para ambos diseños corrige esta deficiencia, dado que el retorno de la sierra se produce separándose de la pieza, lo que permite la recuperación de aquella a la posición inicial y el avance de ésta, sin que exista contacto entre ambas.

d).- Si el conjunto móvil fuera deformable, la disposición de los radios de empuje y de la rueda hidráulica sobre el mismo eje no es posible, pues el eje de ésta es horizontal y el de los radios ha de ser vertical para poder mover hacia abajo a las barras. La representación de Adam y Varéne supone el empuje de los radios en el canto de las barras.

- Dado que los diseños realizados contemplan el giro en los puntos -A- y -C-, si es posible que la rueda hidráulica y los radios estén sobre el mismo eje, según se muestra en la figura 3.1.4.

e).- En el dibujo original la sierra está situada en el plano que forma el tronco que hace de ballesta en su desplazamiento, no siendo este plano paralelo al eje de la pieza. Esta disposición haría el corte formando un ángulo con el eje de la pieza e impediría su desplazamiento.

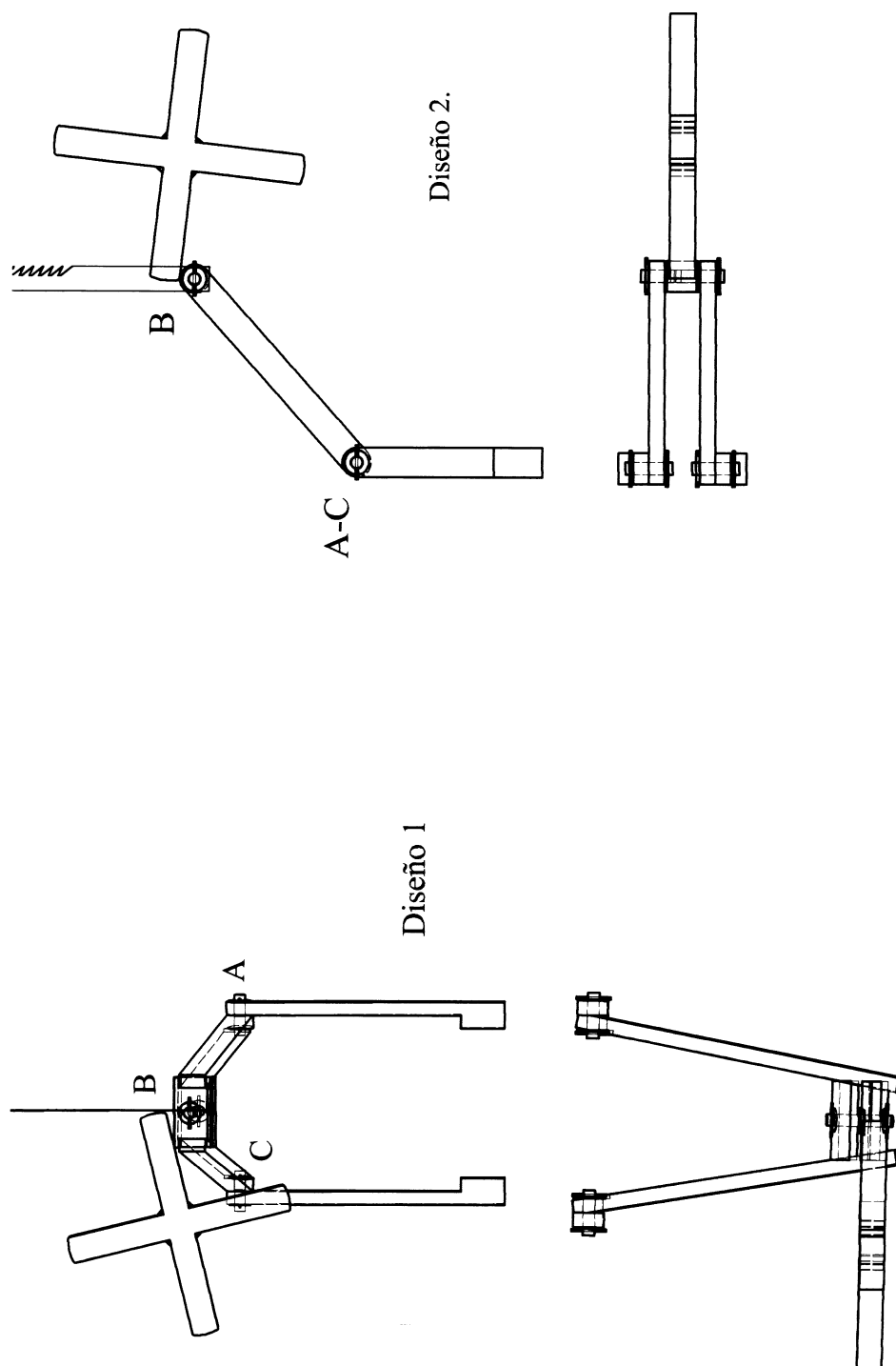


Figura 3.1.4

- Para corregir esta deficiencia en el diseño 1, se ha situado, el eje de sujeción de la sierra, perpendicular al plano de corte y se ha realizado en el extremo de ésta una caja que permite el desplazamiento del útil, manteniéndose así en el mismo plano (figura 3.1.5).
- En el diseño 2 se ha fijado la ballesta a un soporte en forma de puente que permitiría pasar entre sus pies derechos la pieza a cortar. La sierra, en este caso, se situaría sobre el plano que forma el eje del tronco en su movimiento, produciendo un corte lineal (figura 3.1.7).

f).- El movimiento de la pieza producido por la rueda de puntas provocaría los siguientes efectos, según se supongan instaladas las soportes en “U” y donde se efectúe el impulso:

1.- Con lados paralelos verticales: si el impulso se efectúa clavando las puntas en el lateral de la pieza, ésta sería empujada horizontalmente contra los lados paralelos de los soportes que dificultarían el desplazamiento por el rozamiento. Si el arrastre lo efectúa la rueda clavando las puntas sobre la parte baja de la pieza, el movimiento de ésta sería ascendente y no tendría obstáculos.

2.- Con lados paralelos horizontales, tal como muestra el dibujo: si el impulso se realiza sobre el lateral de la pieza, el desplazamiento se produciría sin dificultad, pero al no existir obstáculo empujaría sobre la sierra estorbando su

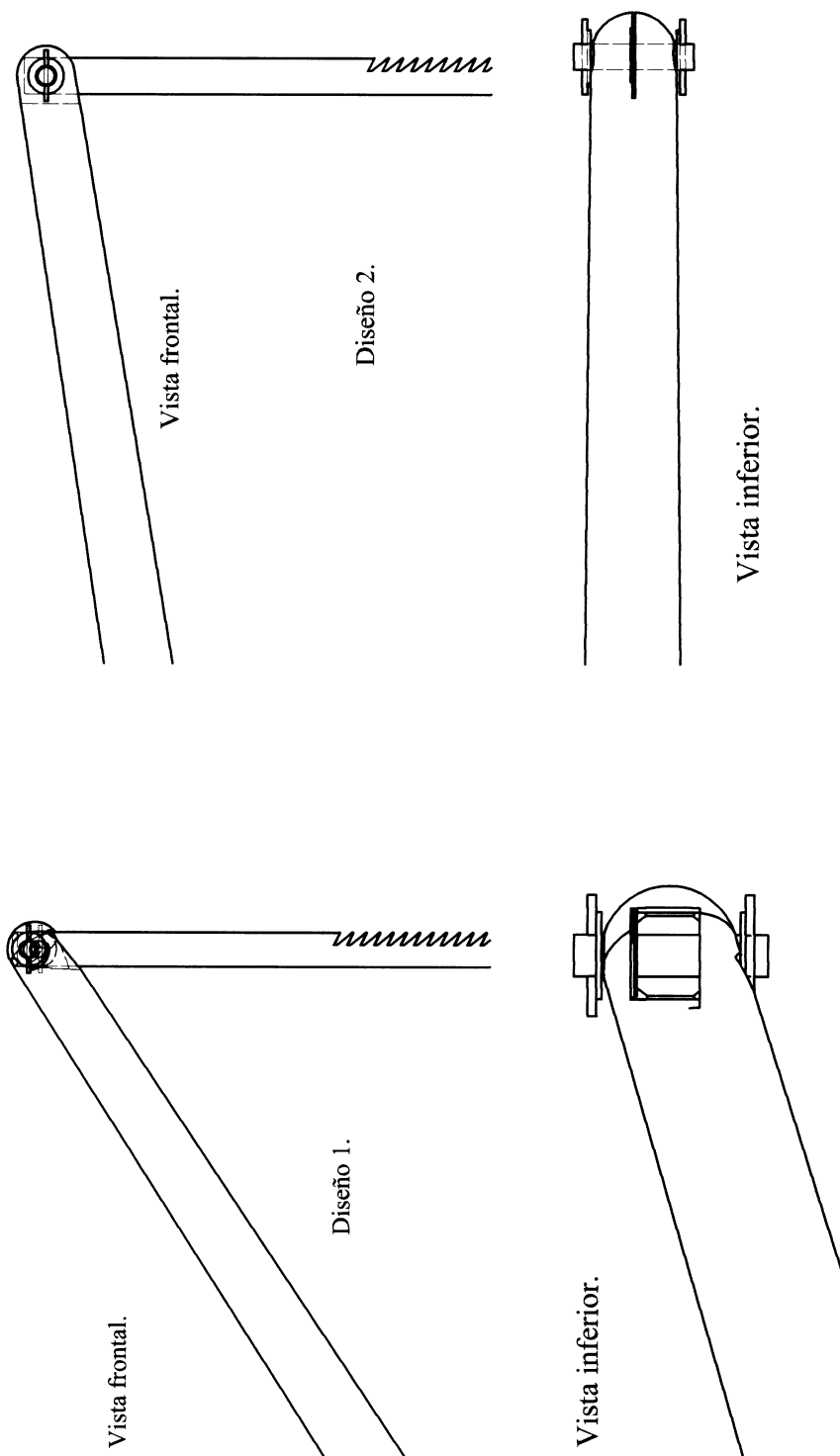


Figura 3.1.5.

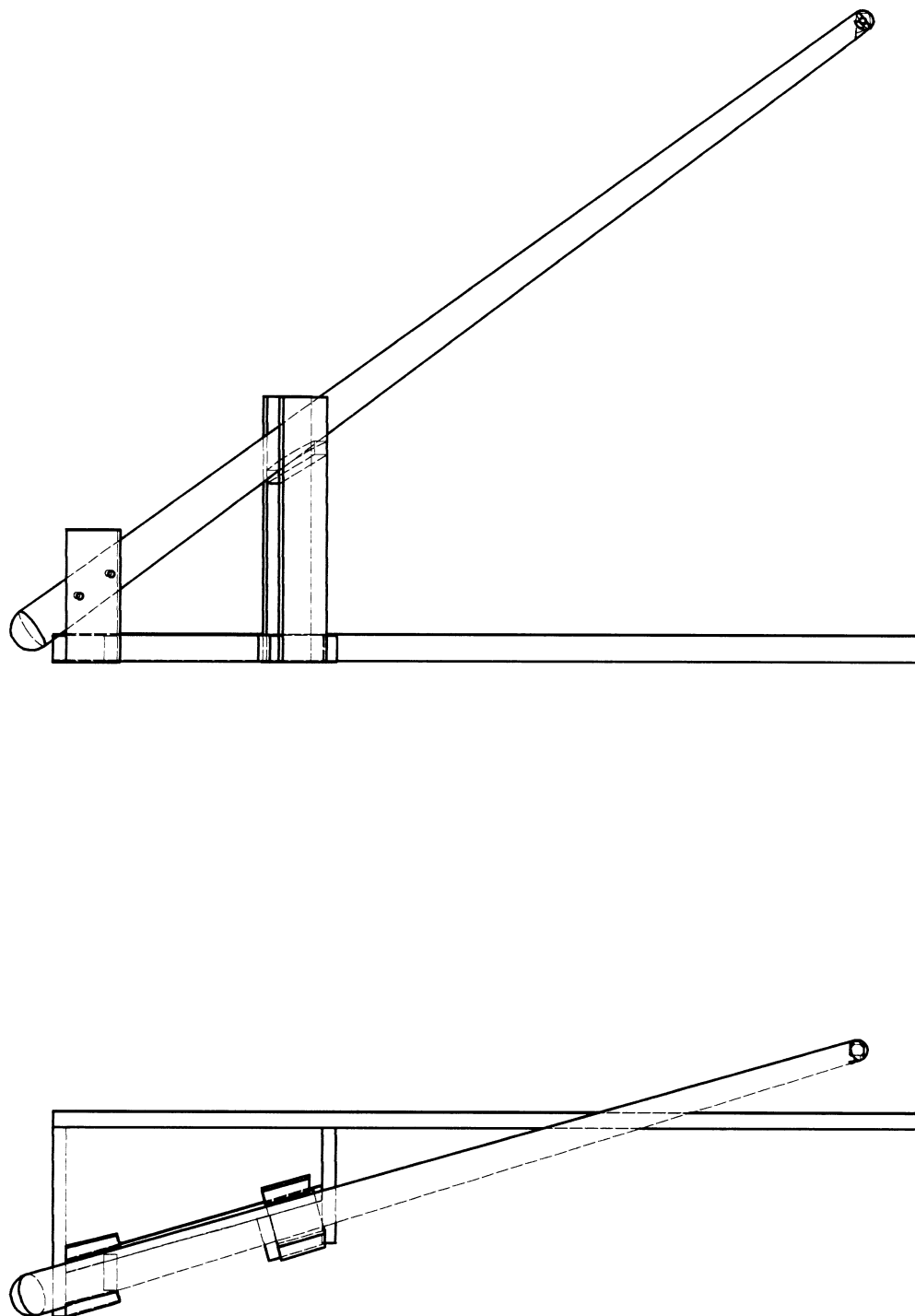


Figura 3.1.6.

movimiento. Si se realiza debajo de la pieza, ésta se elevaría produciéndose fricción sobre los lados paralelos del soporte, dificultando el desplazamiento.

Observados ambos casos la solución adoptada es situar los soportes con los lados paralelos verticales y la rueda de puntas en la parte inferior de la pieza. Esta disposición permite utilizar el mismo eje para las tres ruedas, la hidráulica, la de radios y la de puntas, como el dibujo original presenta.

Los inconvenientes mencionados en los puntos a), b), c), d) y e), hacen improbable el uso de la máquina. En los casos descritos en f), se dificulta el funcionamiento pero podría realizarlo, aunque con resultados poco previsibles, que dependerían de la potencia disponible en la rueda hidráulica y de la perfección que se exigiera al corte.

El desplazamiento de la pieza impulsada por la rueda de puntas, sería posible para el caso de corte en madera, pero no para la sierra de cortar mármol descrita por Auxonio en el verso del Mosela.

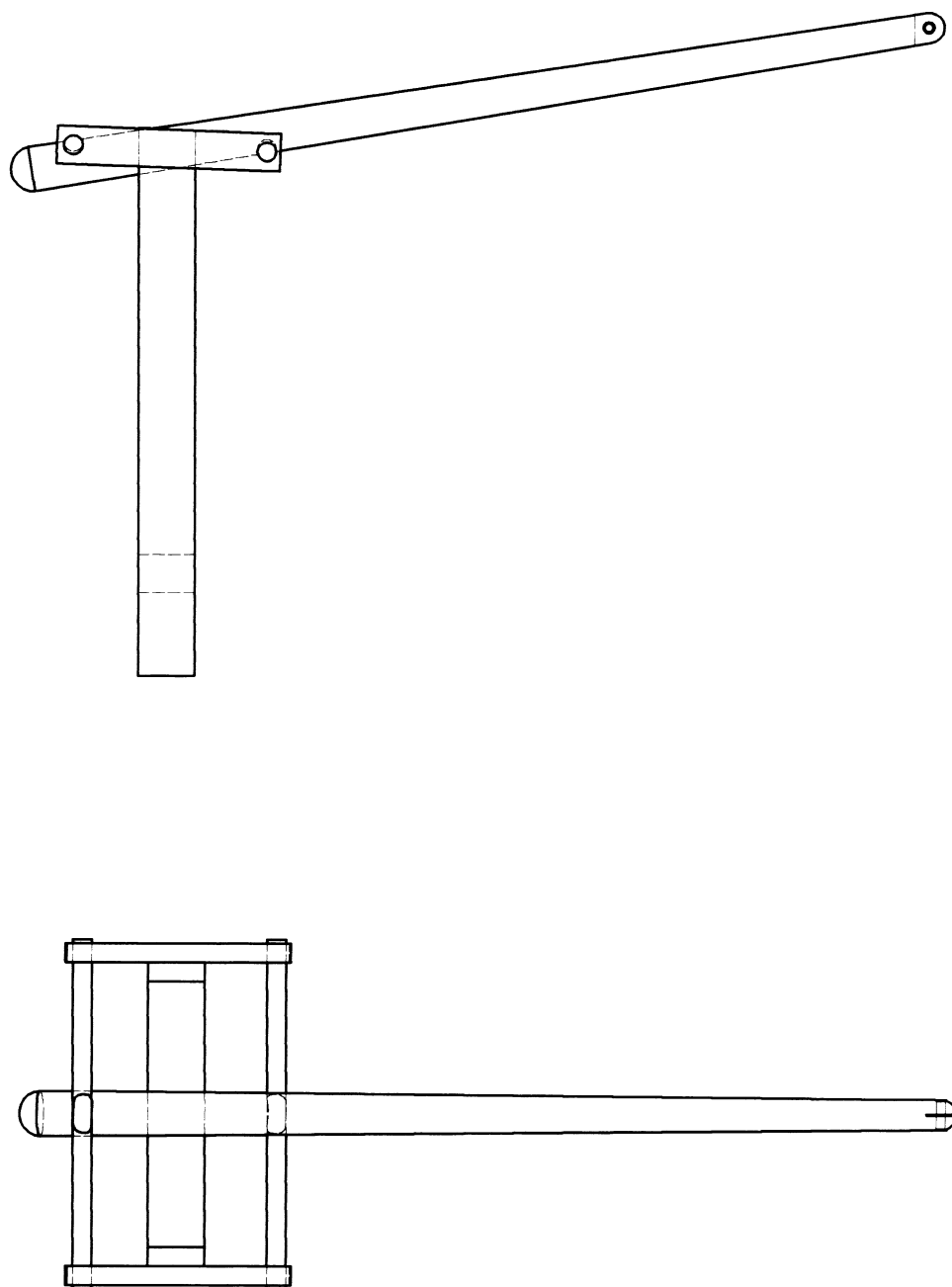


Figura 3.1.7.

3.1.4.- Verificación de las deficiencias del dibujo original.

Los defectos en el funcionamiento encontrados en el dibujo, son analizados a continuación con objeto de evaluar gráfica y analíticamente sus consecuencias en el funcionamiento de una supuesta máquina semejante a la del modelo original. Debido a que algunos de los efectos negativos no precisan de esta evaluación, pues la simple observación del movimiento deja bien patente el inconveniente, solo se estudian aquellos más sobresalientes que pueden ser mejor comprendidos con la demostración. Estos análisis se refieren esencialmente al movimiento de la sierra.

3.1.4.1.- Desvío entre la ballesta y la pieza.

Según la figura 3.1.1, la ballesta se sujeta a un tronco clavado en el suelo situado junto a la máquina. No se representa la bancada necesaria, pero el espacio que la pieza ocupa en todo su recorrido, obliga a desplazar la sujeción del mencionado tronco a un lateral de ella. El estudio obtiene el valor de este desplazamiento para los parámetros que se detallan a continuación:

- Grueso máximo de la pieza a serrar. 60 cm.
- Altura máxima de la fibra lateral superior BC. 152 cm.
- Longitud de la ballesta AD. 400 cm.
- Angulo de la ballesta con el suelo α 35°

los valores anteriores son estimados, solamente el correspon-

diente a -BC- que se deduce de los que en el diseño propuesto se han dado a la dimensión máxima en alto que puede tener la pieza a serrar y la altura respecto al suelo de su plano inferior, tal que:

$$BC = 92 + 60 = 152 \text{ cm.}$$

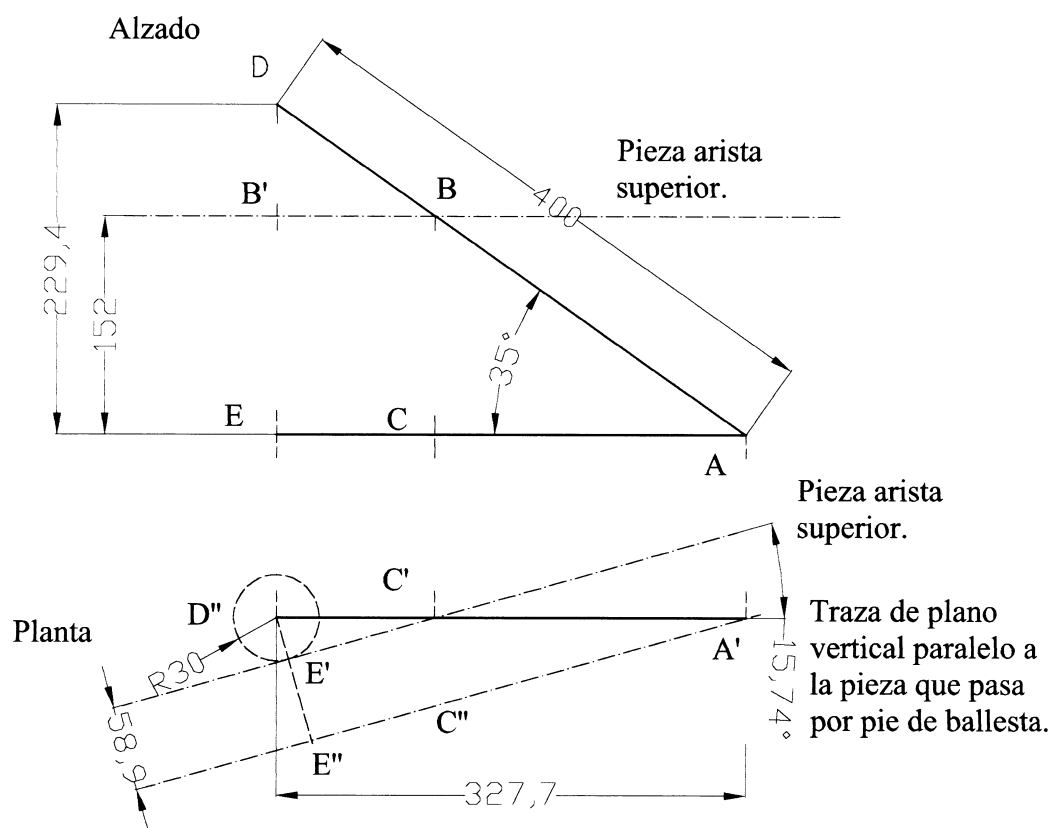


Figura 3.1.8.

De esta misma figura se deduce:

$$\overline{BC} = 152 \text{ cm.}$$

$$\overline{AC} = \overline{BC} \times \frac{1}{\text{tag}.\alpha} = 152 \times \frac{1}{\text{tag}.35^\circ} = 217,08 \text{ cm.}$$

$$\overline{AE} = \overline{AD} \times \cos \alpha = 400 \times 0,819 = 327,66 \text{ cm.}$$

$$\overline{DE} = \overline{AD} \times \text{sen } \alpha = 400 \times 0,5736 = 229,4 \text{ cm.}$$

y de la planta en la misma figura se obtiene:

$$\overline{A'C'} = \overline{AC} \quad \text{y} \quad \overline{A'D''} = \overline{AE}$$

$$\overline{D''E'} = 30 \text{ cm.} \quad (\text{mitad del ancho de la pieza})$$

de la semejanza de los triángulos $A'C'C''$ y $C'D''E'$ se deduce:

$$\frac{\overline{A'C'}}{\overline{C'D''}} = \frac{\overline{C'C''}}{\overline{D''E'}} \Leftrightarrow \frac{217,08}{327,66 - 217,08} = \frac{\overline{C'C''}}{30}$$

$$\overline{C'C''} = 58,9 \text{ cm.}$$

$$\beta = \text{arc. sen } \frac{\overline{C'C''}}{\overline{A'C'}} = \text{arc. sen } \frac{58,9}{217,08} = 15,74^\circ$$

por lo que la base de la ballesta ha de estar a 58,9 centímetros de separación mínima del lateral de la pieza y formando con éste un ángulo de $15,74^\circ$. Para que el corte siguiera el eje de la pieza, el plano de la sierra tendría que formar ese mismo ángulo con el eje de la ballesta.

En el alzado de la figura anterior el eje del tronco de ballesta en su movimiento de subida y bajada, se ha supuesto sobre el plano del papel.

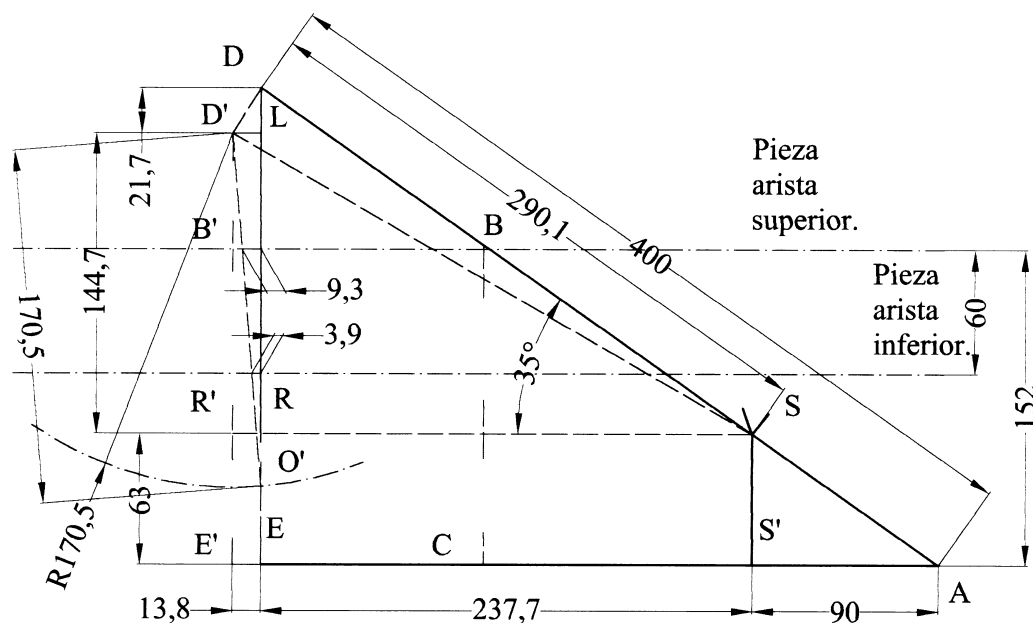
3.1.4.2.- Desplazamiento transversal de la sierra.

La posición desviada respecto al plano de corte que ha de tener el tronco de la ballesta, según se ha deducido en 3.1.4.1, provoca que el extremo de la sierra se desplace transversalmente en el movimiento de subida y bajada. Por esto, los extremos de la sierra se mueven en planos diferentes que forman un ángulo de $15,74^\circ$ antes averiguado.

En este apartado se valora el desplazamiento que se genera entre los extremos de la sierra, por causa de que éstos no se mueven en el mismo plano. Se obtendrá analítica y gráficamente este desplazamiento y el que se produciría a la altura del plano superior en la pieza respecto al eje del corte.

En el esquema de la figura 3.1.9 se representa el alzado de la anterior, en el cual se ha dibujado a trazos la posición inferior de la ballesta -SD'-. En él se obtienen los valores de los desplazamientos horizontal -D'L- y vertical -DL-, del punto -D- sujeción de la sierra a la ballesta. También los desplazamientos que se producen alejándose de la pieza, B'B'' en el plano superior y RR' en el inferior.

Se ha supuesto como centro de giro del extremo de la ballesta a -S- apoyo libre de ésta sobre la horquilla. La distancia AS' que separa los anclajes del tronco de la ballesta y del apoyo en horquilla, se ha supuesto de 90 centímetros por semejanza con el dibujo original.



Diseño 1

Figura 3.1.9.

Aunque el arco descrito por el extremo del tronco de ballesta no es perfecto, pues el radio variará con la flexión de la rama, se mantiene este razonamiento por ser el error cometido de poca magnitud. Los valores a utilizar son los definidos y averiguados en el apartado anterior, obteniéndose para los que son objeto de este estudio los siguientes:

$$\overline{RS} = \overline{ES'} = \overline{AE} - 90 = 327,66 - 90 = 237,66 \text{ cm.}$$

$$\overline{R'S} = \sqrt{\overline{D'S}^2 - \overline{D'R'}^2} = \sqrt{290,13^2 - 144,71^2} = 251,46 \text{ cm.}$$

$$\overline{D'S} = \overline{DS} = \frac{\overline{RS}}{\cos.\alpha} = \frac{237,66}{0,819} = 290,13 \text{ cm.}$$

$$\overline{D'R'} = \overline{DR} - \overline{DL} = 166,41 - 21,7 = 144,71 \text{ cm.}$$

$$\overline{DR} = \overline{RS} \times \tan.\alpha = 237,66 \times 0,7 = 166,41 \text{ cm.}$$

$$\overline{D'L} = \overline{R'S} - \overline{RS} = 251,46 - 237,66 = 13,8 \text{ cm.}$$

este último valor corresponde al desplazamiento horizontal de la unión del tronco de ballesta con la sierra en el plano del papel que contiene el movimiento del eje del tronco de ballesta.

El desplazamiento de la sierra hacia la izquierda del dibujo se obtiene:

$$\overline{D'LO'} \approx \overline{RR'D'} \Leftrightarrow \frac{\overline{LO'}}{\overline{D'L}} = \frac{\overline{B''O'}}{\overline{B'B''}} = \frac{\overline{RO'}}{\overline{RR'}}$$

$$\frac{169,94}{13,8} = \frac{110,7}{\overline{B'B''}} = \frac{50,7}{\overline{RR'}}$$

$$\overline{LO'} = \sqrt{\overline{D'O'}^2 - \overline{D'L}^2} = \sqrt{170,5^2 - 13,8^2} = 169,94 \text{ cm.}$$

$$\overline{B'B''} = 8,99 \text{ cm}$$

$$\overline{RR'} = 4,12 \text{ cm}$$

Según la figura 3.1.10, el desplazamiento en sentido transversal al eje del corte que se produciría en la unión del tronco de ballesta y la sierra es HH' de valor 3,8 centímetros, obtenido gráficamente en el dibujo. El desplazamiento a la altura de la

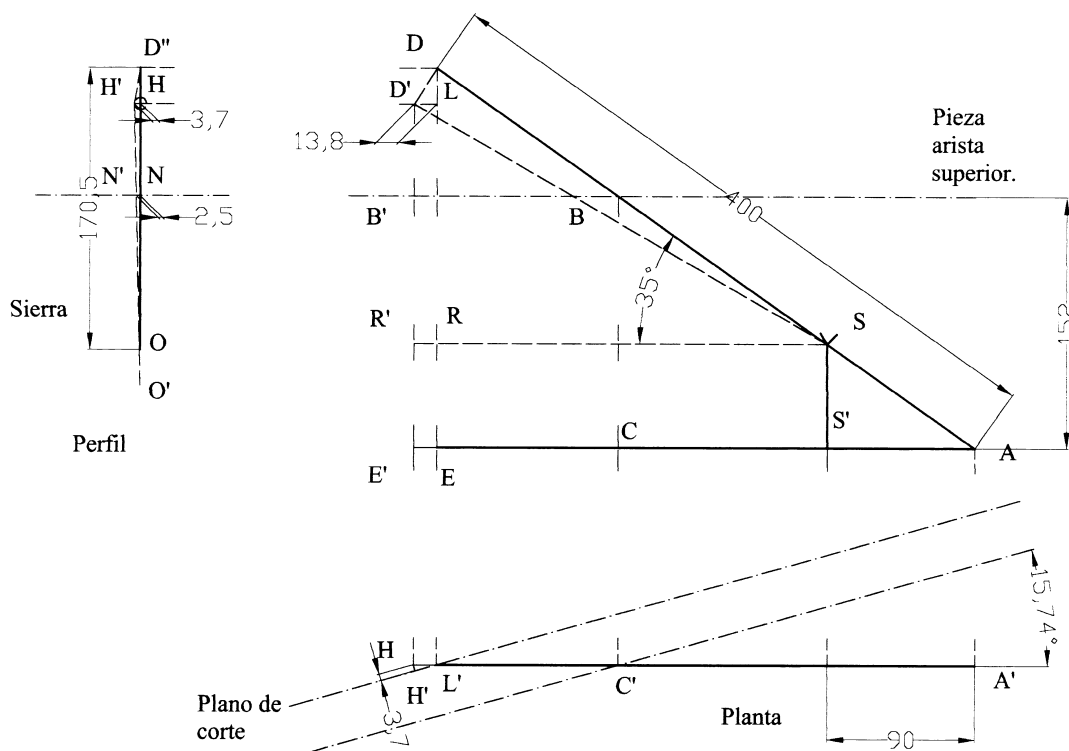


Figura 3.1.10.

cara superior de la pieza es NN' de 2,6 centímetros. En el perfil se ha representado solo la sierra.

El estudio gráfico se ha realizado integrando en esta última figura las dos anteriores y como en ellas el plano del dibujo es el formado por el tronco de ballesta en su movimiento. Se realiza a continuación el estudio analítico tomando como base para el cálculo los datos y los valores obtenidos en los dos estudios anteriores.

En la planta de la figura 3.1.10, el triángulo HH'L' está formado por HL' que representa el desplazamiento horizontal del extremo superior de la sierra y el tronco de ballesta, y por HH' que es la distancia recorrida por la unión de ambos elementos, normal al eje de corte de la pieza.

En el triángulo HH'L', $\overline{HL'} = \overline{EE'} = 13,7 \text{ cm.}$

$$\overline{HH'} = \overline{HL'} \times \text{sen } \beta = 13,8 \times \text{sen } 15,74 = 3,74 \text{ cm.}$$

desvío que se produce en la unión superior de la sierra con el extremo del tronco de ballesta.

El valor del desplazamiento a la altura del corte que se produce en la cara superior de la pieza, se obtiene en el perfil de la misma figura, por la semejanza de los triángulos HH'O' y NN'O' que se forman por el movimiento de la sierra. Las posiciones O y O' son las que ocupa el extremo de la sierra que se une al conjunto móvil -ABC-:

$$\frac{\overline{H'O'}}{\overline{N'O'}} = \frac{\overline{HH'}}{\overline{NN'}}$$

$$\overline{H'O'} = \text{Longitud de la sierra} = 170,5 \text{ cm.}$$

$$\text{De la figura 3.1.8, } \overline{N'O'} = 92 + 60 - 41,6 = 110,4 \text{ cm.}$$

El valor de los sumandos de -N'O'- corresponde el primero a la altura del plano inferior de la pieza, el segundo al espesor máximo supuesto para ésta y el tercero a la altura que se encuentra del suelo en la posición baja la unión del extremo inferior de la sierra con el conjunto móvil.

$$\text{Sustituyendo: } \frac{170,5}{110,4} = \frac{3,74}{\overline{NN'}} \Leftrightarrow \overline{NN'} = 2,42 \text{ cm.}$$

El desplazamiento en la parte superior del corte de casi 25 milímetros es, sin duda, elevado e impediría el movimiento de la sierra. En el diseño 1 se ha eliminado este desplazamiento lateral, uniendo la sierra a la ballesta con un eje normal al plano de corte que absorbe el desplazamiento al permitir deslizarse el útil por él, manteniéndose el movimiento en un plano perpendicular.

3.1.5.- Descripción del mecanismo propuesto.

Las soluciones que se han propuesto para eliminar los inconvenientes observados en el dibujo de la máquina original, requieren realizar algunas modificaciones en ella, resultando otra con aspecto exterior parecido al del modelo que podría ser una de las posibles formas que le hubieran permitido funcionar.

La máquina que existió podría haber presentado diferentes aspectos según el artesano que la hiciera y lo que sí parece normal es que el tratamiento que tuviera el material del que fuera construida sería aceptable y, respecto al acabado, tendría un aspecto más parecido al del diseño propuesto que a la representación muy personal de V. de Honnecourt. El trabajo de la madera era, cuanto menos, admisible en aquella época, como lo demuestran sus otros dibujos referidos a la construcción y las obras de valor artístico y monumental que aún perduran.

El diseño propuesto tiene cierta perfección técnica de la que quizás no dispuso la máquina original, aunque ya existían en la época estos elementos empleados en otros usos. El transporte, la navegación, la minería, disponían de uniones y otros dispositivos similares a los utilizados en el modelo.

Una adaptación al modelo propuesto que le hace diferente en todo a la representación del modelo original es la bancada, pero se ha optado por ella, porque sería muy complicado realizar la máquina sin un soporte que mantuviera a las distancias precisas los diferentes componentes que la forman, aunque con ello el aspecto cambie sustancialmente.

Se han diseñado estas bancadas, representadas en las figuras 3.1.22 y 3.1.23, para situar sobre ella los diferentes elementos de la máquina y se le ha unido el soporte de ballesta y el de la rueda hidráulica, formando un conjunto homogéneo que permitiría mantener las distancias entre las diferentes partes móviles y variar su emplazamiento. Sin duda que la sierra hidráulica real habría tenido algún tipo de bancada, aunque no formaran los componentes una única estructura.

La fijación del tronco de ballesta en un puente del diseño 2, para con ello situar la sierra en el eje del corte evitando el inconveniente del desplazamiento del útil que se produce en el diseño 1, al no estar sierra y ballesta en el mismo plano, se propone como modificación posterior que mejora y haga posible el funcionamiento de la máquina. La solución propuesta en el di-

seño 1 resuelve el problema al nivel teórico, pero produciría un funcionamiento irregular y un corte imperfecto al no estar fija la sierra.

La unión de la sierra en sus extremos se ha diseñado con ejes metálicos fijados con pasadores. Esta forma de sujeción, como antes se comentó, ya era empleada en el siglo XIII en diferentes mecanismos y en la construcción y podría estar representada en el dibujo original por el punto que aparece en las barras, con esa forma tan peculiar de representación que emplea el autor en sus dibujos.

En ambos diseños el conjunto móvil ABC estará formado primeramente por dos soportes fijos unidos por el extremo inferior a la bancada y con taladro en el extremo superior que se unirán a las barras móviles por medio de un eje y pasadores, similares a los del tronco de ballesta. La unión de los dos soportes fijos a la bancada se hará de forma que en la posición de reposo el extremo inferior de la sierra esté en la misma vertical del superior.

En el diseño 1 el extremo inferior de la sierra se une deslizante a un eje perpendicular al plano de corte que, a su vez, se fija a las barras -AB- y -CB- con dos puentes cortos de madera. En el puente más alejado del giro se realiza el empuje de los radios a la sierra. La figura 3.1.11 representa esta disposición.

En el diseño 2 el extremo inferior de la sierra se sujeta al eje que une las dos barras giratorias gemelas -AB- y -CB-. Esta

unión hace a la sierra avanzar hacia la pieza cuando se produce el corte en el movimiento de descenso. En este mismo punto contactan los radios de la rueda que hacen bajar la sierra. Se ha dispuesto para ello que el eje de unión de estas dos barras, atraviese a un cilindro recto hueco de madera con topes provistos de arandela y pasador que pueda girar sobre él. En este cilindro se apoyan los radios que hacen bajar la sierra. El cilindro giratorio se ha insertado porque con esta disposición se facilita el movimiento, ya que el giro del cilindro suaviza la fricción. La disposición de este conjunto móvil es similar a la del dibujo original, pero modificándose la posición de las barras fijas y el punto de contacto de los radios.

El eje único que se representa en el dibujo original uniendo las dos ruedas y los radios de accionamiento se mantiene, modificando únicamente la forma de representarlo, haciéndolo mas parecidos a los que aparecen en dibujos de máquinas de la misma época. Para la fijación de las ruedas a los ejes, se construyen éstos de sección cuadrada y se hace un taladro cuadrado en las ruedas para encajar en aquel.

En las zonas de apoyo de los ejes se clavaban longitudinalmente barras metálicas cilíndricas, sobre las que se producía la fricción con los soportes, haciendo coincidir los ejes de simetría de la sección cuadrada y de las barras cilíndricas. De esta forma se ha dibujado el del modelo propuesto.

Los radios que aparecen en el dibujo atravesados en el

propio eje, se han insertado en él a la misma distancia del extremo, para producir el empuje en el mismo punto del conjunto móvil.

La rueda provista de puntas que produce el empuje a la pieza, tiene la misma forma del dibujo original e igualmente tiene cuatro clavadas en la superficie lateral.

La situación de los radios y de rueda de puntas sobre el mismo eje, ha sido posible al modificar el punto de contacto de los radios con las barras del conjunto móvil, pasándolo al eje común de las barras -AB- y -BC- y hacer el clavado y empuje de las puntas en el plano inferior de la pieza a cortar.

La rueda hidráulica se ha situado al extremo del único eje, con una representación similar a la que aparece en los dibujos de Agrícola. De igual forma los soporte del eje común se han representado de manera semejante a como aparecen dibujadas por el antes mencionado autor. Todos los soportes van unidos a la bancada y el de la rueda hidráulica se ha reforzado con tirantes.

Los soportes en forma de "U" para la pieza a serrar, tienen la misma forma que aparece en el dibujo original y van unidos a la bancada por medio de unos pies derechos. Aunque no se representa en el dibujo, la base horizontal de estos soportes iría taladrada para situar los largueros cilíndricos en cualquiera de ellos y así regular los distintos anchos de las piezas y las distintas situaciones del corte.

El funcionamiento es igual al descrito en 3.1.2.

3.1.6.- Diseño de los componentes de las máquinas.-

Con las soluciones adoptadas en los apartados precedentes, se ha realizado el diseño de cada uno de los mecanismos que componen la máquina, desarrollando previamente los básicos. Se ha utilizado para ello, principalmente, el procedimiento gráfico y, en los casos necesarios o para comprobación, el cálculo analítico, obteniéndose así las dimensiones de cada uno de ellos.

3.1.6.1.- Barras del conjunto deformable.

El dibujo de ambos diseños se representa en las figuras 3.1.11 y 3.1.12, en el que se acotan las distancias y dimensiones fundamentales. Es el elemento básico para obtener el resto de los componentes de la máquina.

Las longitudes de cada una de las barras que lo forman se dan, para las fijas entre el centro de taladros y la línea base de la bancada, y para las móviles entre centro de taladros. La posición que ocupa cada una de ellas se define estimando por las que figuran en el dibujo original, la separación de las fijas y las distancias que hay desde los taladros del extremo a la línea base. Esta línea base se hace coincidir con la cara inferior de los tableros que forman la estructura principal de la bancada.

Se representan en la figura 3.1.13 las desviaciones de las barras en su movimiento y el avance que generan en la sierra.

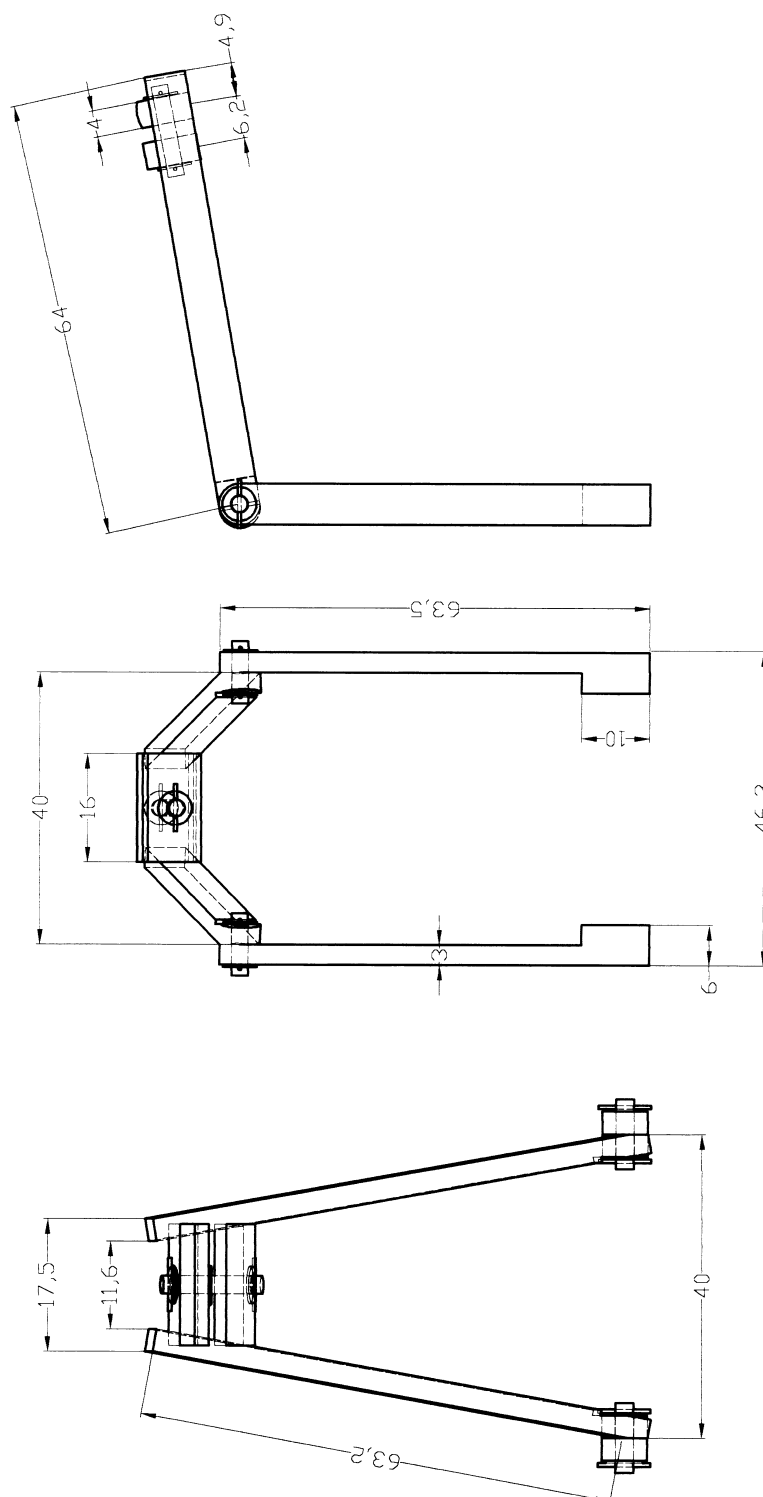


Figura 3.1.11.

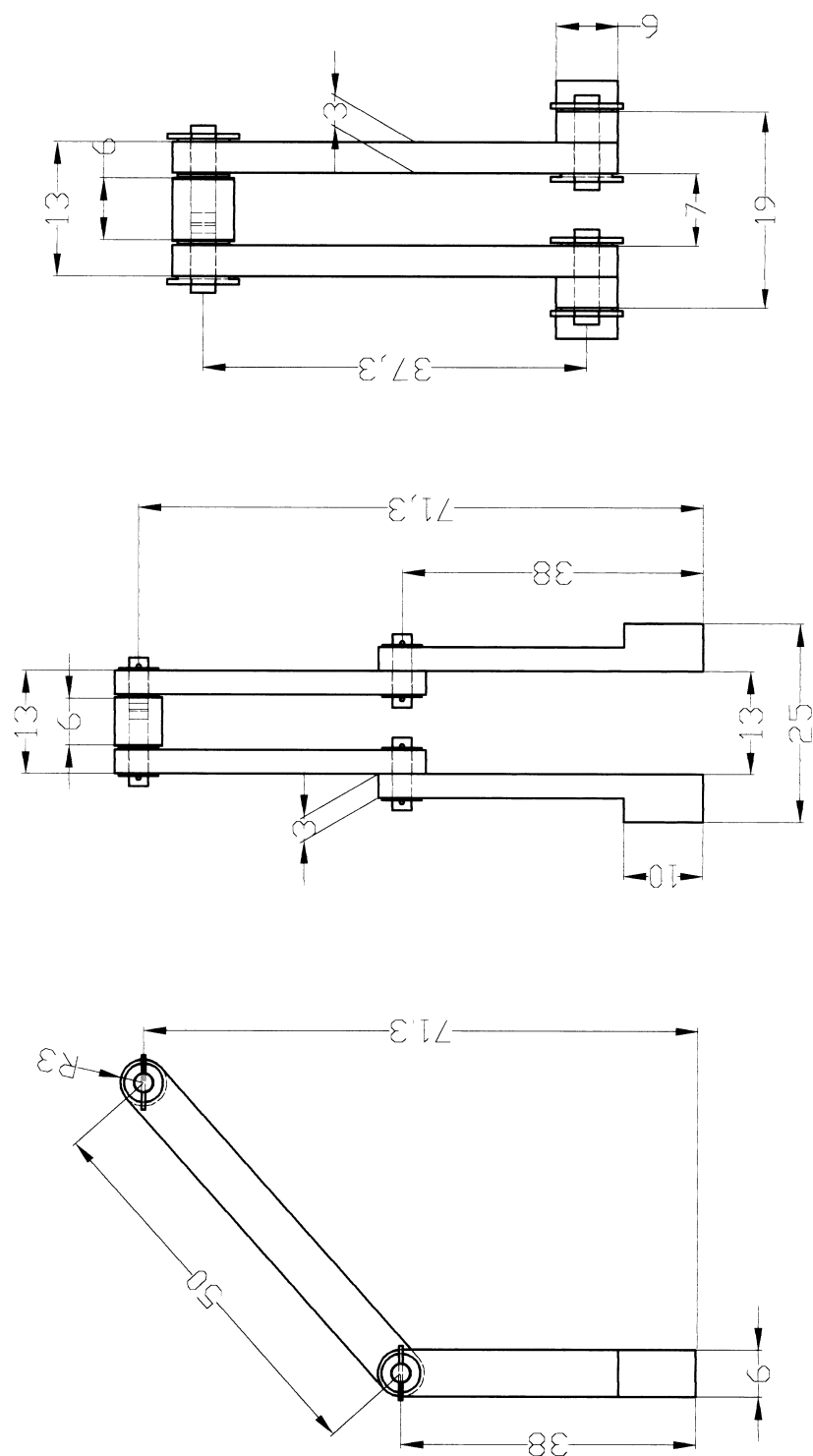
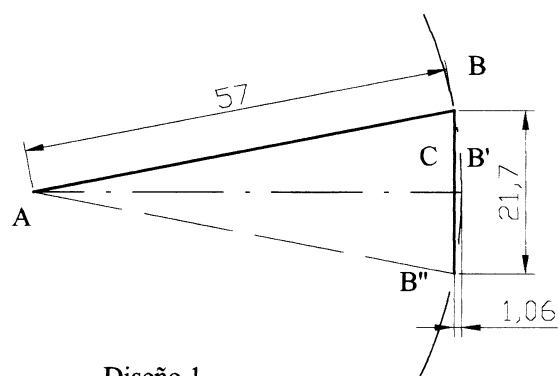
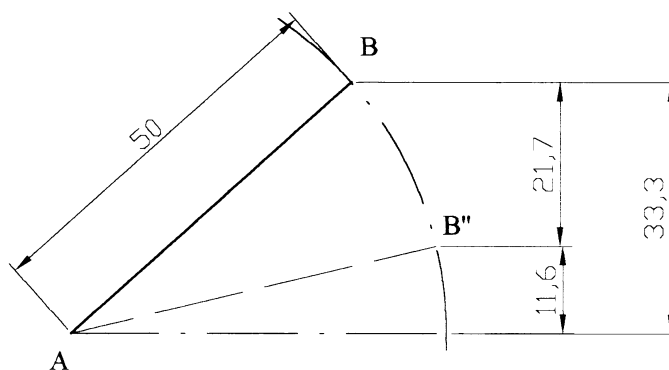


Figura 3.1.12.



Diseño 1



Diseño 2

Figura 3.1.13.

Los soportes fijos y móviles de ambos diseños se representan en la figura 3.1.14 y se unirán a los largueros que forman la bancada. No soportan esfuerzo, estando solo sometidas al momento que le produce la sierra durante el corte que es de escaso valor por estar a 25 milímetros del centro del apoyo y repartirse en una línea de 50 milímetros que es el ancho del radio de empuje.

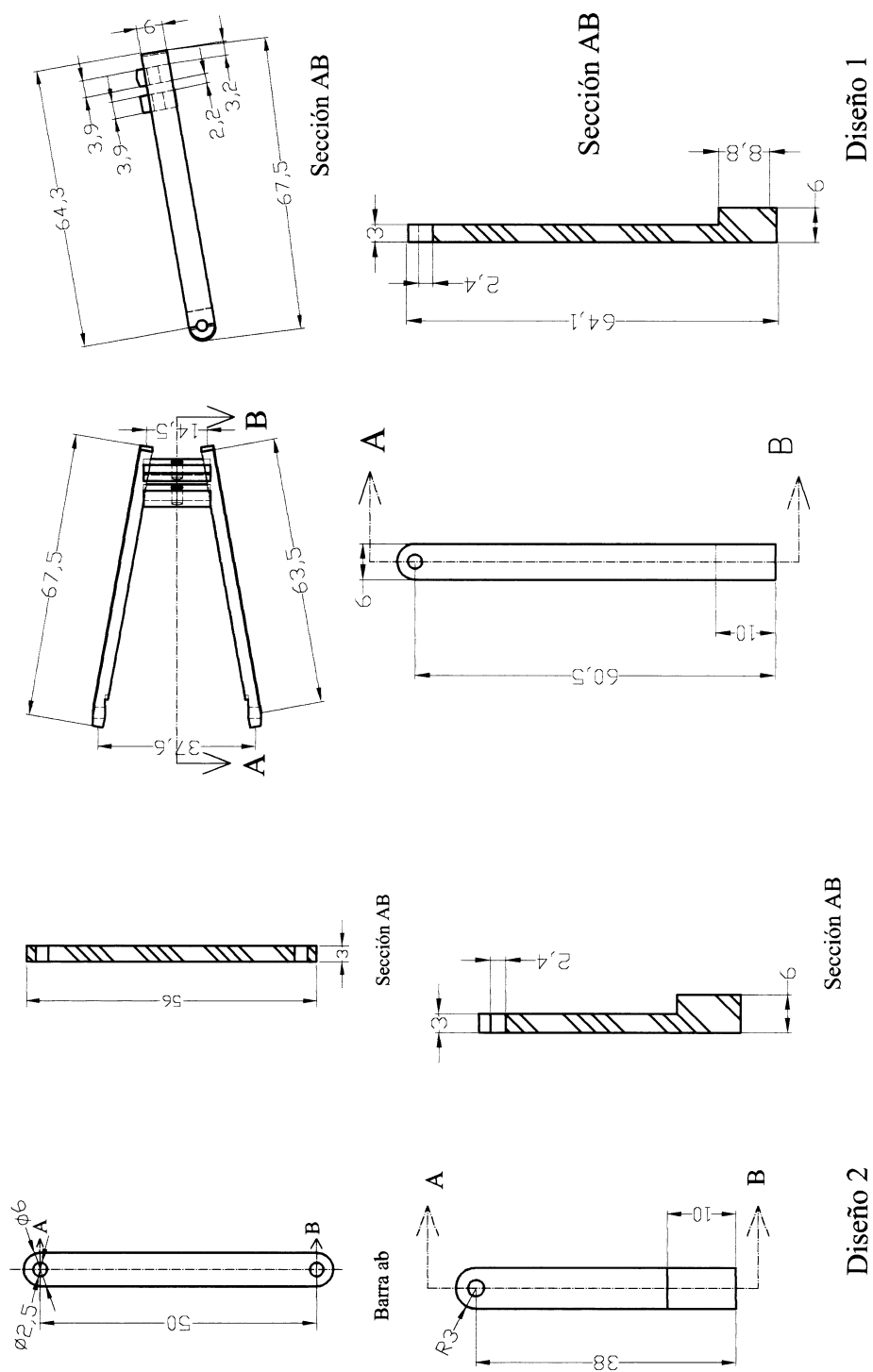


Figura 3.1.14.

Para la realización de los modelos se ha fijado que el punto de contacto situado en -B- esté a la misma altura de la base de la bancada que el centro del eje motor, en el inicio del empuje de los radios al conjunto móvil. El diámetro de la periferia de los radios se ha supuesto de 51,6 cm. Además el ángulo de contacto se ha supuesto de 60° medidos entre las dos posiciones extremas que durante el empuje alcanza el eje del radio correspondiente.

Con estos parámetros la sierra tiene el siguiente movimiento:

- Desplazamiento vertical. 21,7 cm.
- Desplazamiento horizontal. 11,3 cm.

En las figuras 3.1.15 y 3.1.16 que corresponden a los diseños 1 y 2, la posición de reposo del conjunto móvil es la dibujada con trazo continuo y la dibujada con líneas a trazos señala la inestable posición inferior. La diferencia entre ambas posiciones define los desplazamientos verticales y horizontales de la sierra, producidos por el empuje de los radios de la rueda.

En ambas se dibuja la rueda de puntas y su posición en el eje. La variación en el diseño 1 se debe a que ha de estar fuera del espacio recorrido por el conjunto móvil. La separación entre radios y rueda es muy similar en ambos casos y salva los espesores de las barras y los salientes de los ejes de unión de éstas.

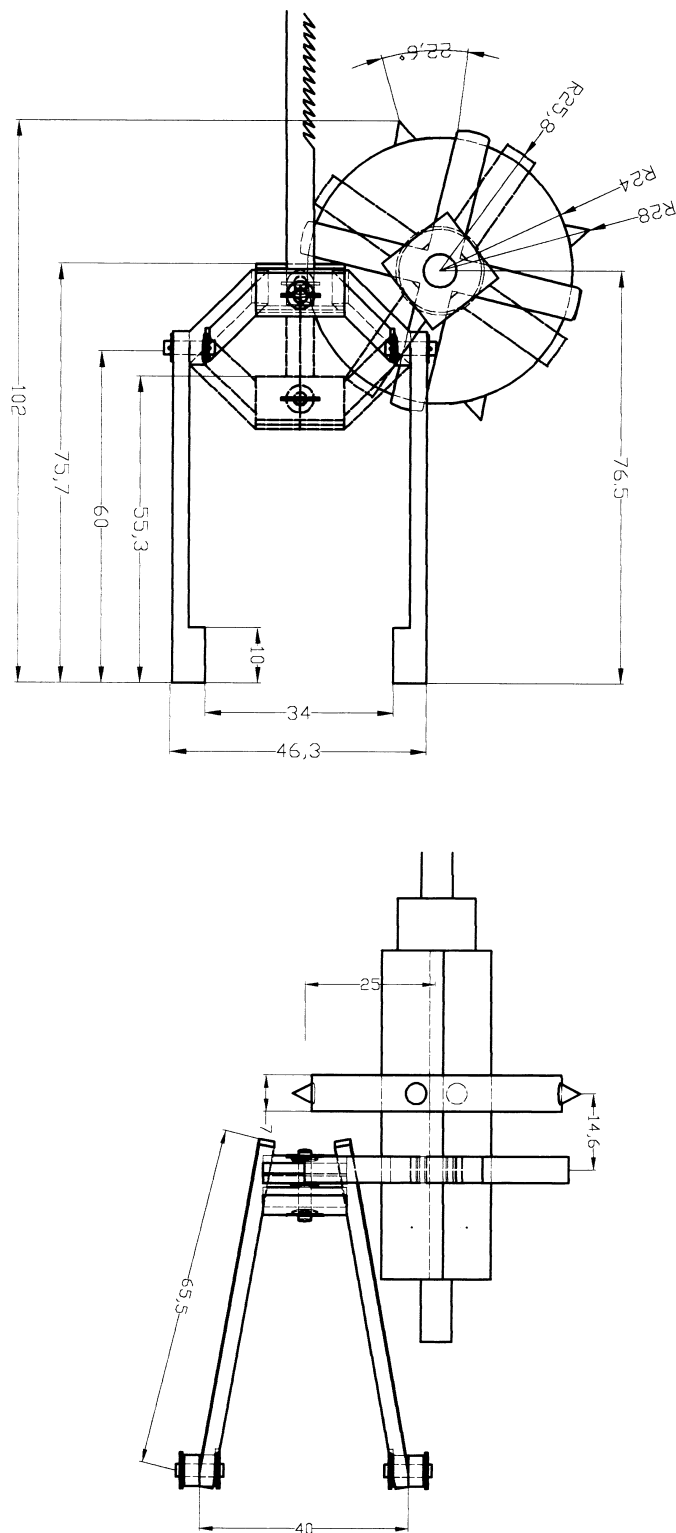


Figura 3.1.15.

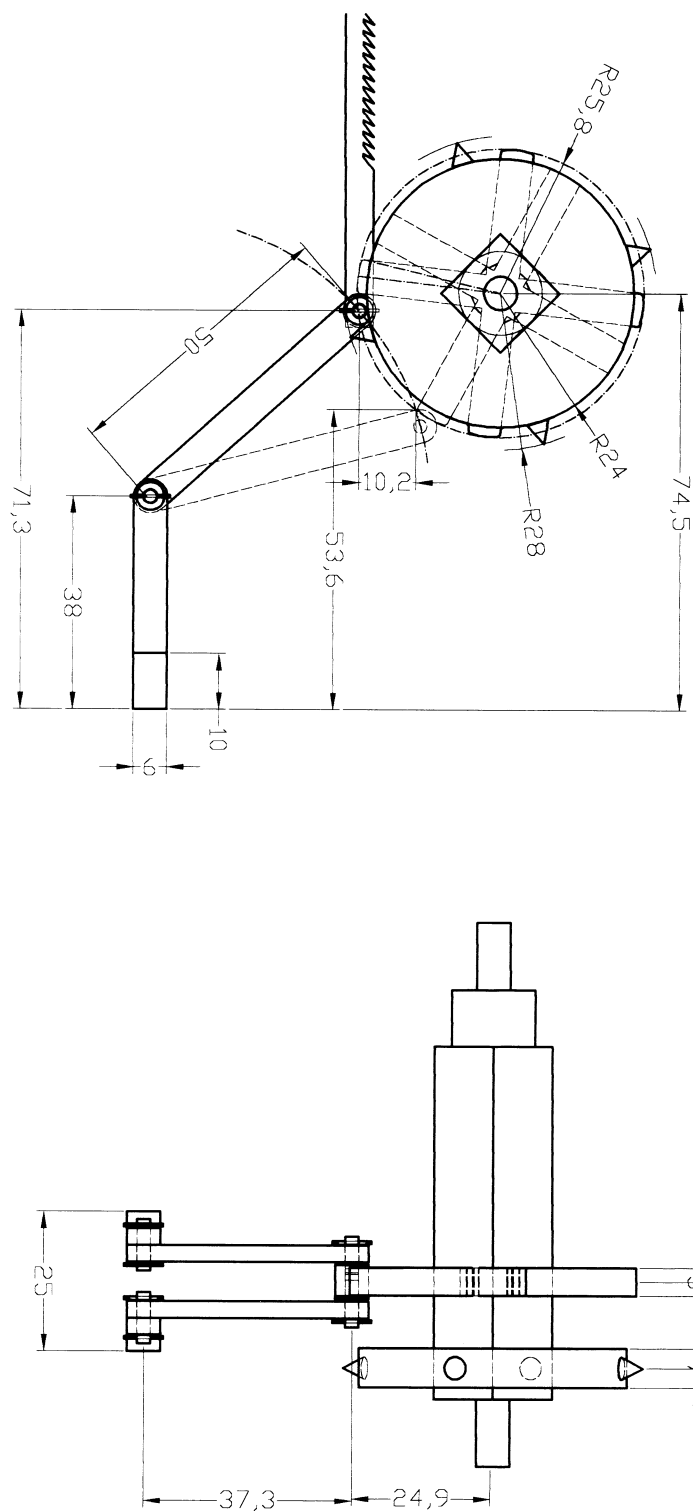


Figura 3.1.16.

3.1.6.2.- Radios y rueda de avance de la pieza.

Sobre el único eje se sitúan los radios de empuje para el movimiento de la sierra y las dos ruedas; una, la de puntas, produce el movimiento de avance de la pieza, y la otra, la hidráulica generadora de la potencia.

En la figura 3.1.15 se ha definido el diámetro exterior de los radios con un valor de 51,6 centímetros, indicando que contiene cuatro dispuestos diametralmente a 90 grados y adosados en la superficie lateral del eje motor. Las dimensiones han sido elegidas por conveniencia del dibujo.

La línea de contacto de los radios con el eje en -B- está, como se definió, sensiblemente a la misma altura del centro del eje que soporta a las ruedas y desplazada de éste en horizontal una magnitud equivalente a la distancia del centro de la circunferencia al extremo de los radios.

La rueda de puntas dispone de cuatro de éstas situadas diametralmente e inician el empuje, en el diseño 1 antes de terminar la sierra el recorrido, y en el diseño 2 cuando la sierra retorna a la posición superior de reposo, cubriendo un ángulo aproximado de 30 grados.

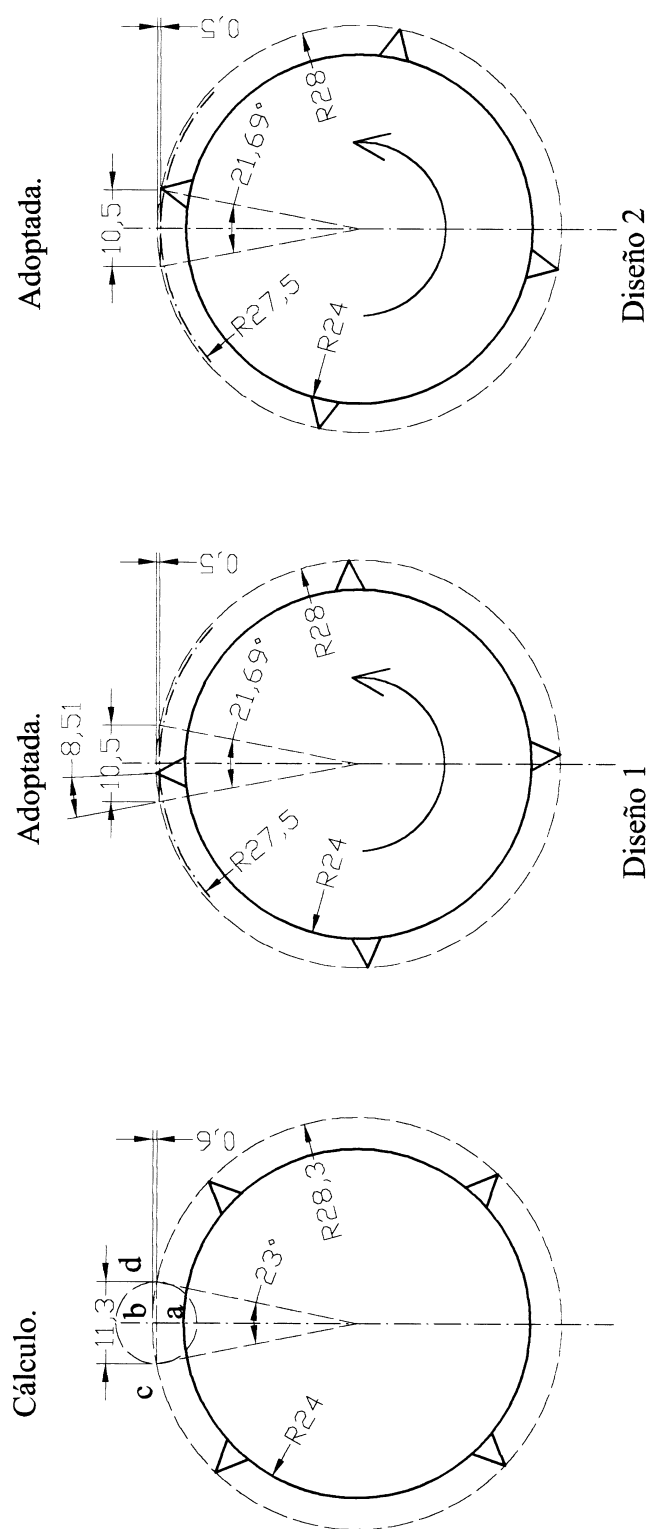
El empuje de la rueda de puntas sobre la pieza se realiza descentrado, dado que la sierra se ha situado en el centro del espacio existente entre los lados paralelos de los soportes en forma de "U". No obstante, los soportes sujetan a la pieza por ambos lados impidiendo desplazamientos laterales.

Las figuras 3.1.15 y 3.1.16, además de representar el conjunto deformable incorpora los radios y la rueda de puntas y define las distancias a las que habrían de situarse en cada uno de los diseños, y la altura de su eje respecto al conjunto deformable y la cara inferior de los tableros de la bancada. Las dimensiones de los radios y la rueda de puntas se indican en ambas figuras.

3.1.6.3.- Dimensiones de la rueda de avance de la pieza.

El diámetro de la rueda ha de ser el adecuado para que en los treinta grados de giro reservados al empuje la pieza avance 11,3 centímetros que es el recorrido horizontal de la sierra en el diseño 2. El diámetro de la circunferencia definida por los extremos de las puntas ha de ser mayor que el del círculo cubierto por la rueda de radios, con objeto de que ésta pueda girar libremente debajo de la pieza.

Con estas premisas establecidas para el diseño 2, se calcula el radio de una circunferencia, en la cual una cuerda de longitud 11,3 centímetros abarque un arco circular de 30 grados. En el estudio se ha considerado el ángulo de 23 grados, debido a que el radio resultante con el arco anterior es menor que el de la rueda de radios. Además la medida es adecuada, ya que deja un margen en el giro que permite retornar la hoja sin movimiento en la pieza.



Posición de las puntas al retorno de la sierra.

Figura 3.1.17.

En la figura 3.1.17 se representa la rueda teórica con los parámetros establecidos que son:

- Longitud de desplazamiento. 11.3 cm.
- Angulo de giro. 23°
- Radio mínimo. 26 cm.

$$\text{Radio} = \frac{\overline{cd}}{2 \times \sin \frac{23^\circ}{2}} = \frac{11,3}{2 \times 0,199} = 28.34 \text{ cm.}$$

$$\text{Distancia aO} = \text{Radio} \times \cos \frac{23^\circ}{2} = 27,77 \text{ cm.}$$

El desplazamiento vertical de las puntas durante el tiempo que dura el empuje es:

$$\overline{ab} = 28,34 - 27,77 = 0,57 \text{ cm.}$$

Suponiendo un radio exterior de 28 centímetros, los valores de ángulo y desplazamiento vertical serán:

$$\overline{cd} = 2 \times \text{radio} \times \sin \frac{23}{2} = 11,16 \text{ cm.}$$

$$\text{Distancia aO} = \text{radio} \times \cos \frac{23}{2} = 27,44 \text{ cm.}$$

$$\text{Desplazamiento vertical} = \overline{ab} = 28 - 27,44 = 0,56 \text{ cm.}$$

Con estos últimos resultados, la distancia que ha de haber entre la cara inferior de la pieza y el centro del eje de las ruedas será la de 27,44 centímetros obtenida. La medida se ha redondeado a 27,5 centímetros que corresponde también a la altura que se ha de situar la cara superior del lado horizontal de los soportes en "U", respecto al eje de las ruedas.

Con estos valores, el ángulo recorrido durante el empuje de la pieza y la longitud de la cuerda quedan en:

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{aO}{\text{radio}} = \frac{27,5}{28} = 0,982 \quad \Leftrightarrow \quad \alpha = 21,69^\circ$$

$$\text{Avance} = \overline{cd} = 2 \times \text{radio} \times \sin \frac{21,69}{2} = 10,54 \text{ cm.}$$

En el diseño 1 el avance de la sierra hacia la pieza solo se produce por el giro del tronco de ballesta que, según se observa en la figura 3.1.9 y en el cálculo analítico, es de 4,12 centímetros. Para obtener un corte similar al del diseño 2, parte del recorrido de avance de la pieza ha de realizarse con movimiento en la sierra. En la figura 3.1.17 se representa este avance.

El cálculo es analítico y se realiza por la proporcionalidad que existe entre la longitud de la cuerda y el ángulo que abarca siendo ésta la siguiente a partir de los datos anteriores:

$$\frac{10,5}{21,69^\circ} = \frac{4,12}{X^\circ} \quad \Leftrightarrow \quad X^\circ = 8,51^\circ$$

y el ángulo recorrido mientras la sierra está en movimiento será:

$$Y^\circ = 21,69 - 8,51 = 13,18^\circ$$

3.1.6.4.- Ballesta y sierra.

El tronco de ballesta se ha situado en el diseño 1 sobre un soporte fijo y otro en forma de cuna donde se ha supuesto el giro, situados ambos en el lateral de la bancada, manteniendo la forma del dibujo original y cambiando la posición a la izquierda del dibujo.

En el diseño 2 se ha situado la ballesta en un puente provisto de dos travesaños cilíndricos que sustituyen la sujeción al suelo y el soporte en horquilla. Al tronco de ballesta se le han practicado dos hendiduras semicirculares en la que encajan los travesaños y le impide el desplazamiento longitudinal. El transversal y el vertical se evitan con unas abrazaderas que fijaran la ballesta a los travesaños.

La figura 3.1.18 representa la ballesta y la sierra del diseño 1 y se ha reflejado en forma gráfica el desplazamiento que se produce en la unión por efecto de la flexión. Para la representación se ha tomado como centro de giro el punto de apoyo del tronco de ballesta sobre el soporte en forma de cuna, siendo como se comentó anteriormente, el error cometido al considerar un arco de circunferencia con este centro de poca importancia.

El diseño 2 se muestra en la figura 3.1.19 e igualmente se representa el movimiento del extremo de la ballesta y la sierra, en este caso, combinado con el que le produce el giro del conjunto móvil. El desplazamiento de la sierra avanzando hacia la pieza es de 2,3 centímetros en el extremo superior y de 11,3 centímetros en el inferior.

La posición final de la sierra se muestra en ambos diseños, combinando los desplazamientos del extremo del tronco de ballesta y de la sujeción en el conjunto deformable.

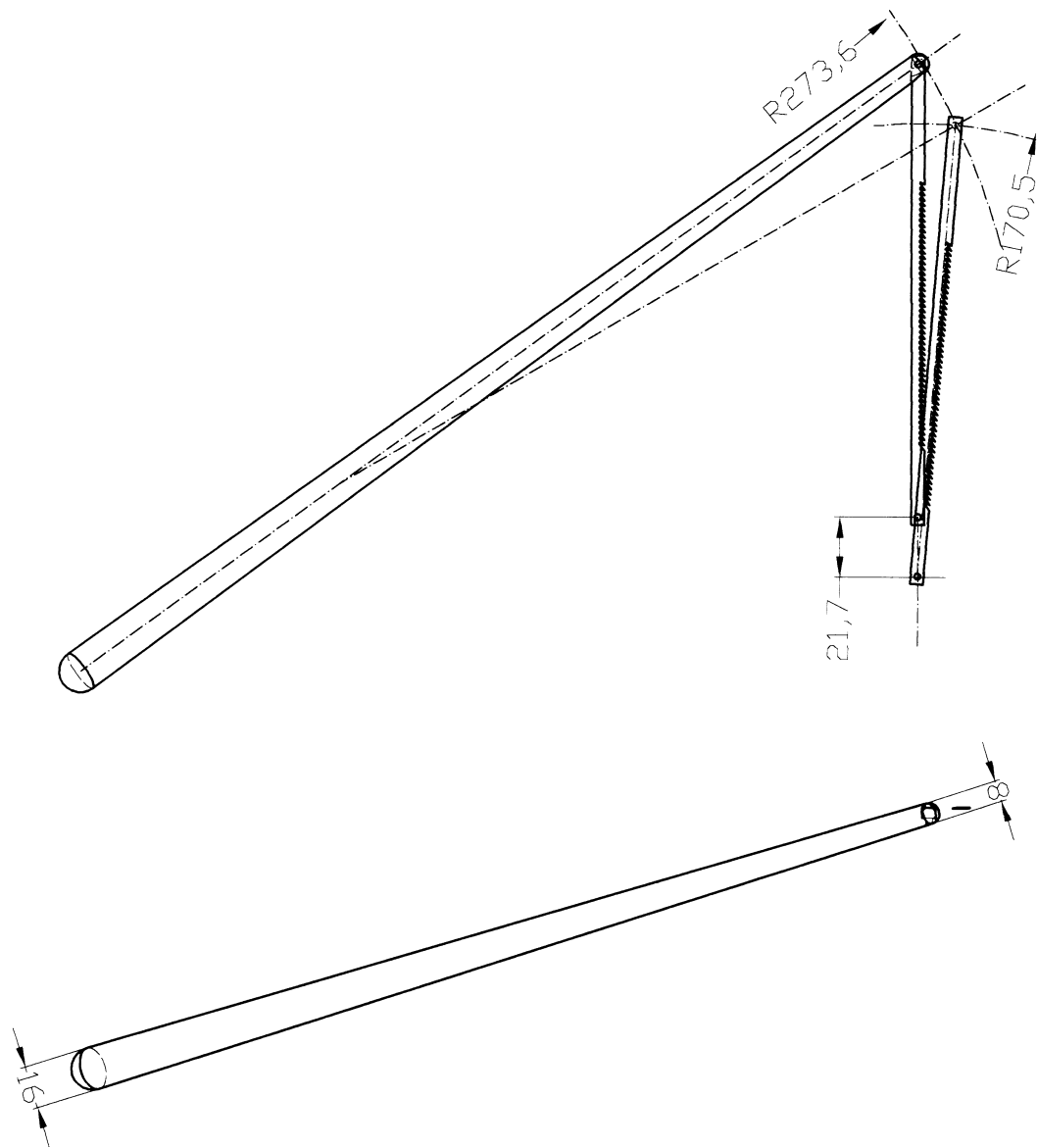


Figura 3.1.18.

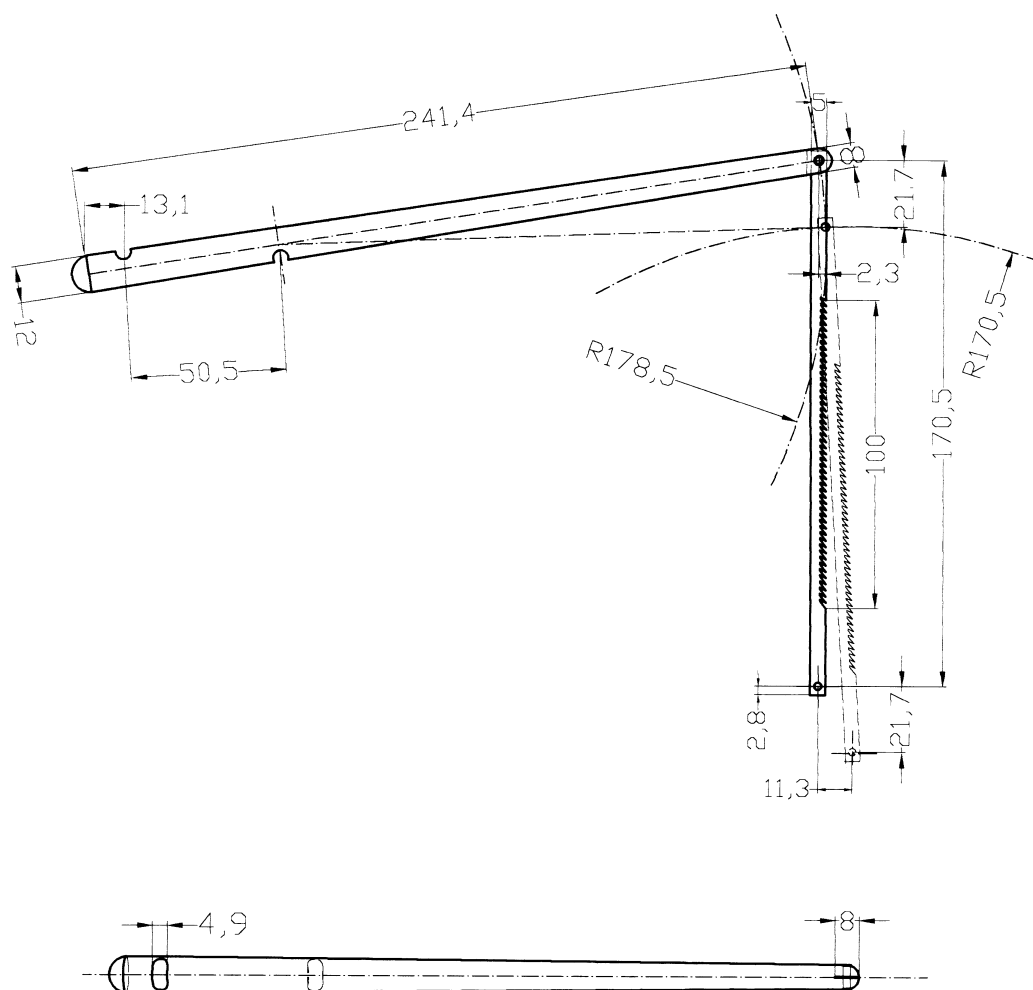


Figura 3.1.19.

3.1.6.5.- Ejes de sierra y de unión de barras.

Se proyectan metálicos con topes provistos de arandelas y pasadores de fijación del mismo material. Son elementos usados en la época para minería, estiba, navíos, carruajes, etc. El hierro forjado se utilizaba en cerrajería artística y su manipulación era usual.

Esta forma de unión se ha adoptado porque el dibujo original las representa con un punto y debido a que la diseñada era y es la forma de unión generalmente utilizada en estos elementos, sería, muy posiblemente, el sistema aplicado en la máquina original.

La forma de la unión es la misma en todos los casos y solo varía la longitud del eje que se adapta a su finalidad. El eje metálico va taladrado en los dos extremos para alojar el pasador que lo inmoviliza. La arandela evita el contacto directo del pasador con las barras.

El eje de unión correspondiente a las barras gemelas -AB- y -CB-, soporta el empuje de los radios de la rueda y a él se coge el extremo inferior de la sierra. En el diseño 1 su longitud es la necesaria para atravesar las arandelas, los puentes cortos de sujeción, la sierra y el desplazamiento de la sierra. En el diseño 2 ha de atravesar las arandelas, las barras móviles, el cilindro de apoyo y la sierra.

La figura 3.1.20 contiene los diferentes tipos de ejes para

uniones utilizados en el modelo.

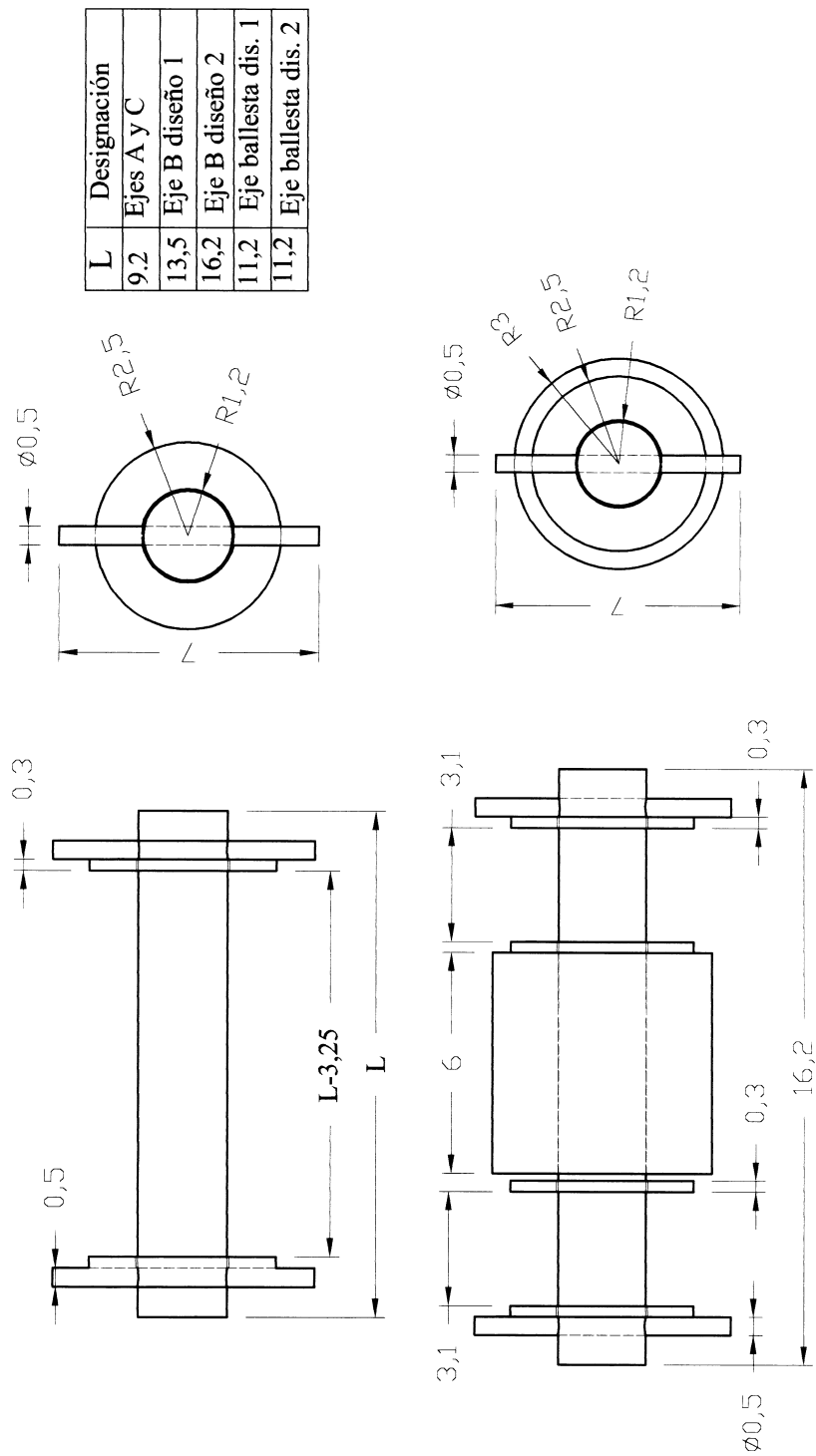


Figura 3.1.20.

3.1.6.6.- Eje de ruedas.

Los diseños presentan una forma de transmisión de la potencia igual al original, emplazando los radios de empuje y las dos ruedas sobre un mismo eje.

Se le ha diseñado como eran los ejes de máquinas utilizada hasta época muy reciente, de madera y con sección cuadrada para no precisar de fijación que impida el giro de la rueda en él.

Los gorriones que han de estar sobre los soportes de la bancada son de hierro de sección circular, con largo adecuado al espesor de los apoyos y van embutidos en los extremos del tramo de madera que termina en forma cilíndrica y son reforzados con un anillo de hierro. Los anillos son de 5 centímetros de grueso y 5 milímetros de espesor.

La figura 3.1.21 lo representa en alzado y perfil. Los puntos de apoyo son tres y las distancias se han elegido para ser representadas dentro del tamaño del papel, sin falta de apreciación.

El eje es el mismo para ambos diseños, solo difieren en la posición de la rueda de puntas no representada en él.

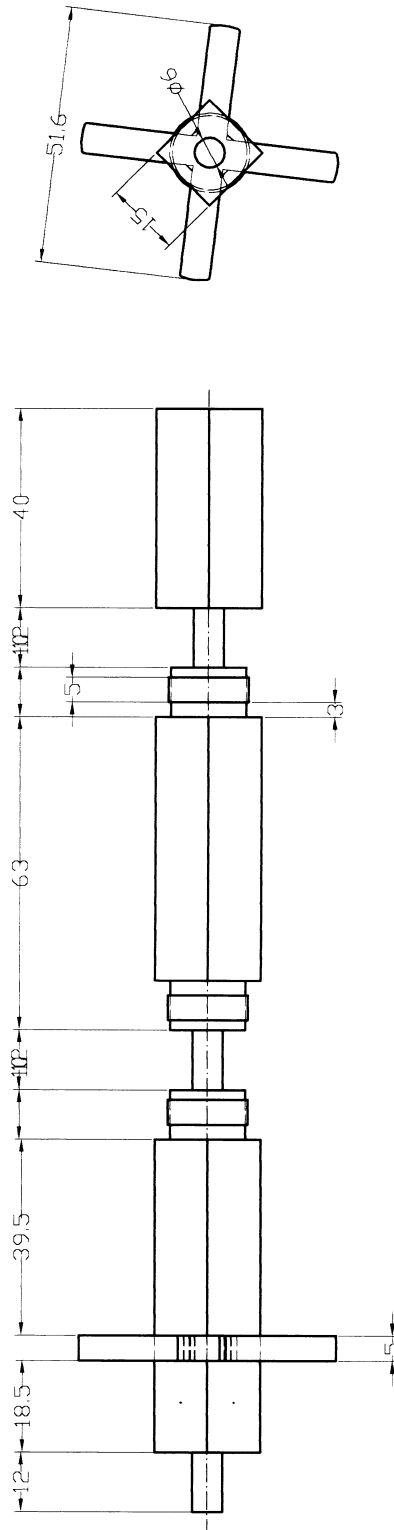


Figura 3.1.21.

3.1.6.7.- Bancada.

No se representa en el dibujo original, pero se ha diseñado pues es de suponer que no hubiera sido posible montar la máquina, si no hubiera dispuesto de un soporte que asignara a cada elemento el sitio adecuado a la distancia necesaria. La idea de realizar una imagen de la máquina lo más cercana posible al dibujo y también a lo que sería en la realidad, obliga a disponer de la bancada para montar sobre ella los diferentes elementos.

La correspondiente al diseño 1 contiene los soportes del tronco de ballesta situados en el extremo de salida de la pieza, con la inclinación deducida del dibujo original. El apoyo de flexión representado en el original por una rama terminada en horquilla, se ha dibujado con dos pilares y un travesaño con el asiento redondeado para favorecer la flexión. Las barras fijas del conjunto móvil se unen a la bancada con una pequeña base adosada al lateral.

El puente de ballesta utilizado en el diseño 2 se ha incorporado a la bancada en el extremo correspondiente a la salida de la pieza cortada. Está situado sobre dos pies derechos de altura aproximada 200 centímetros. Los largueros principales de la estructura se prolongan para unirse a ellos, cerrando el conjunto un travesaño de unión de final de estructura y base de los pies derechos. Sobre los pies derechos que sirven de soporte al puente de ballesta, se ha situado un travesaño a la misma

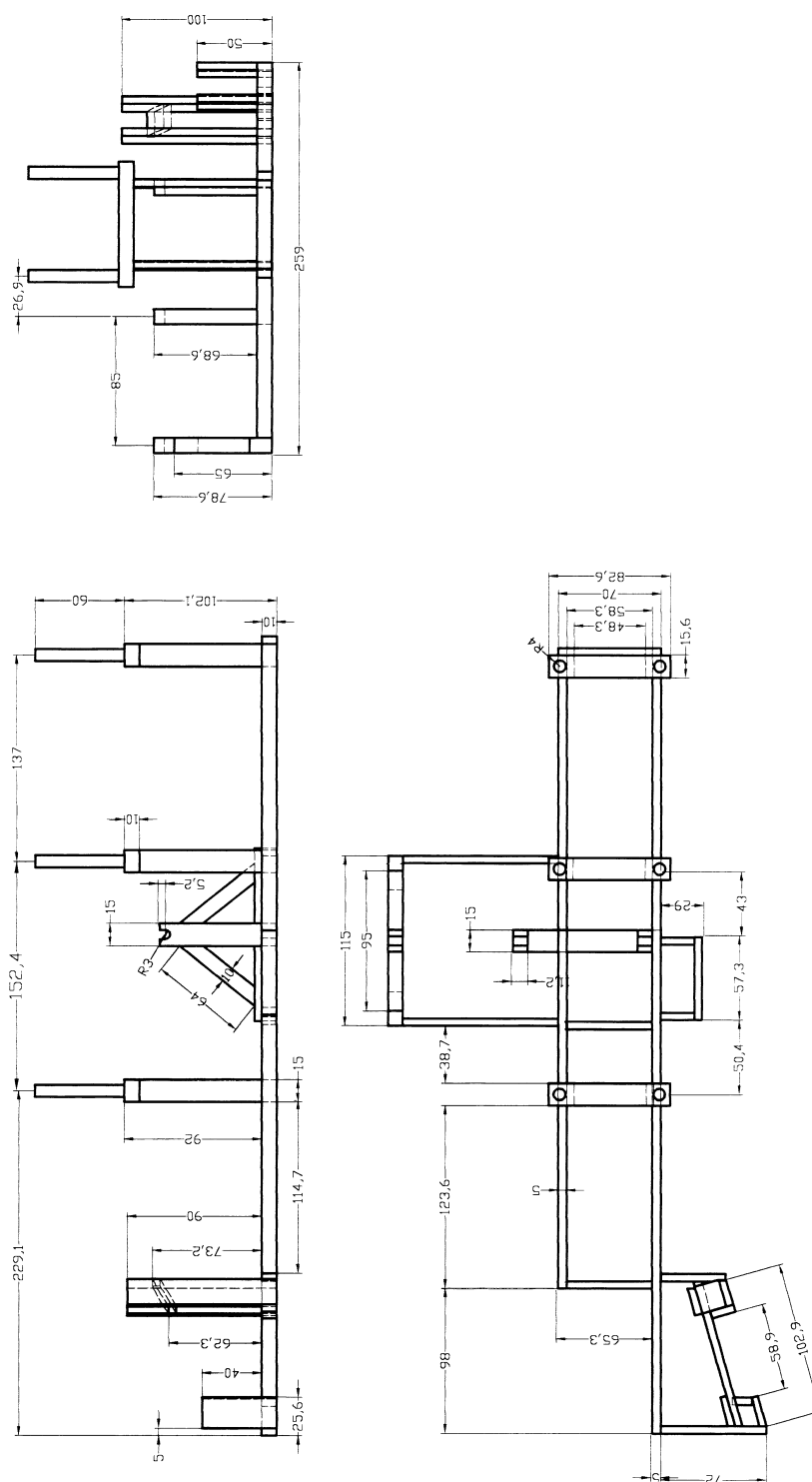


Figura 3.1.22.

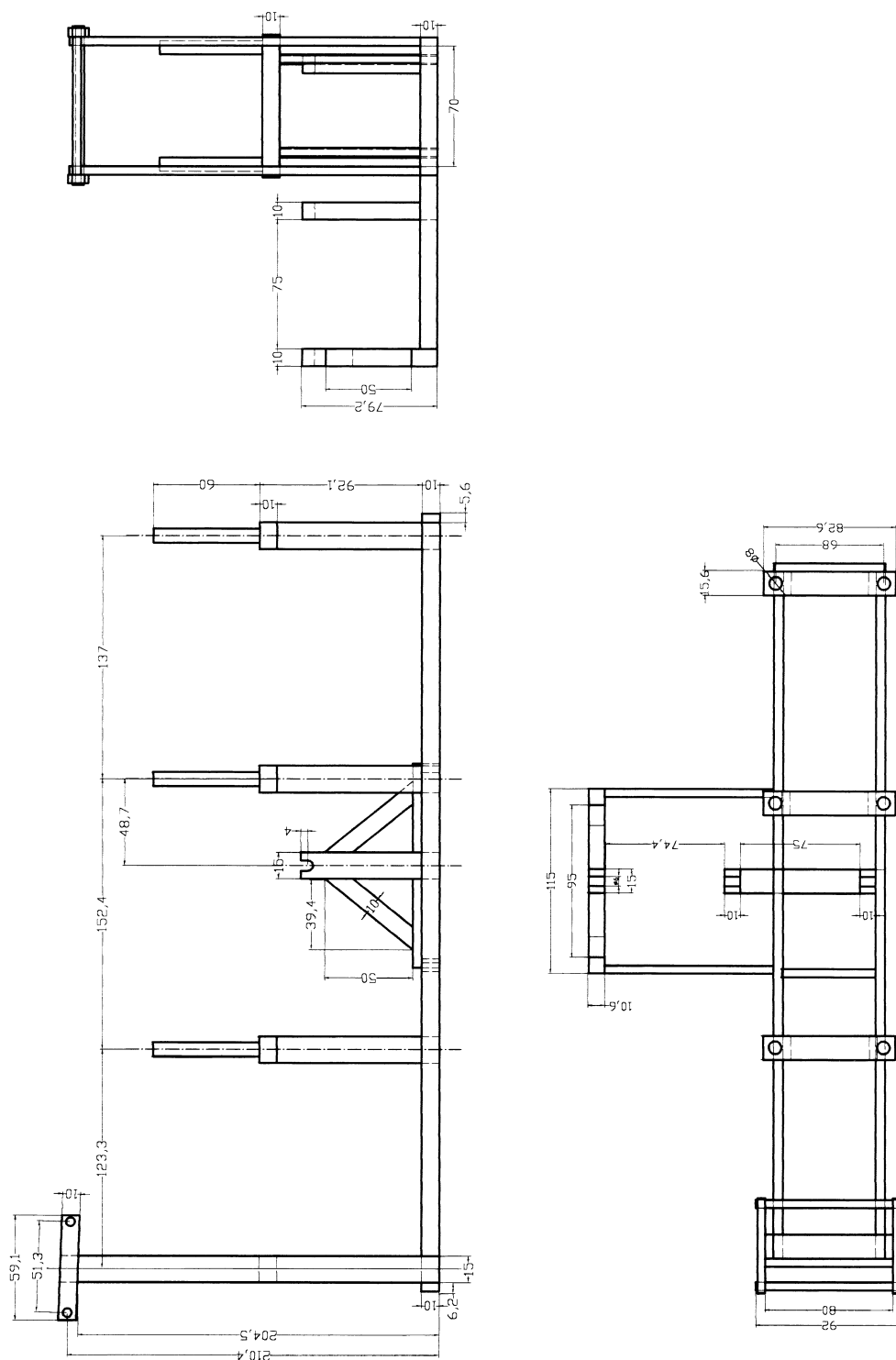


Figura 3.1.23.

altura de la base de los soportes en "U" que sirve de rigidizador y de apoyo de la pieza cortada. En uno de los travesaños se adosan las barras fijas del conjunto móvil.

Los soportes de los ejes de rueda están formados por pies derechos, en cuyos extremos se han tallado unas hendiduras para alojar los cilindros metálicos del eje de rueda. Las hendiduras tienen unas cubiertas situadas en las cabezas de los soportes que impiden al eje salirse de ellas.

En el siguiente estudio que se realiza de la bomba de agua, estas hendiduras se proyectan recubiertas con una placa metálica de poco espesor que facilita la fricción al efectuarse entre dos elementos metálicos. En este caso se supone que también tendrían esa disposición, aunque no se ha integrado en el dibujo.

El soporte correspondiente a la rueda hidráulica se ha reforzado con dos tirantes por el peso de ésta y por el esfuerzo que transmite.

En el diseño 2 el eje de la estructura, el de la sierra y el del tronco de ballesta, forman un plano perpendicular que coincide con el plano de corte.

Los soportes en forma de "U" se han situado sobre dos pies derechos que se fijan a los largueros por su cara interior y soportan el tablero de la base. Este tablero de la base una vez taladrado recibe los topes laterales en la posición deseada. El dibujo representa esta base sin taladrar, situándose los topes a

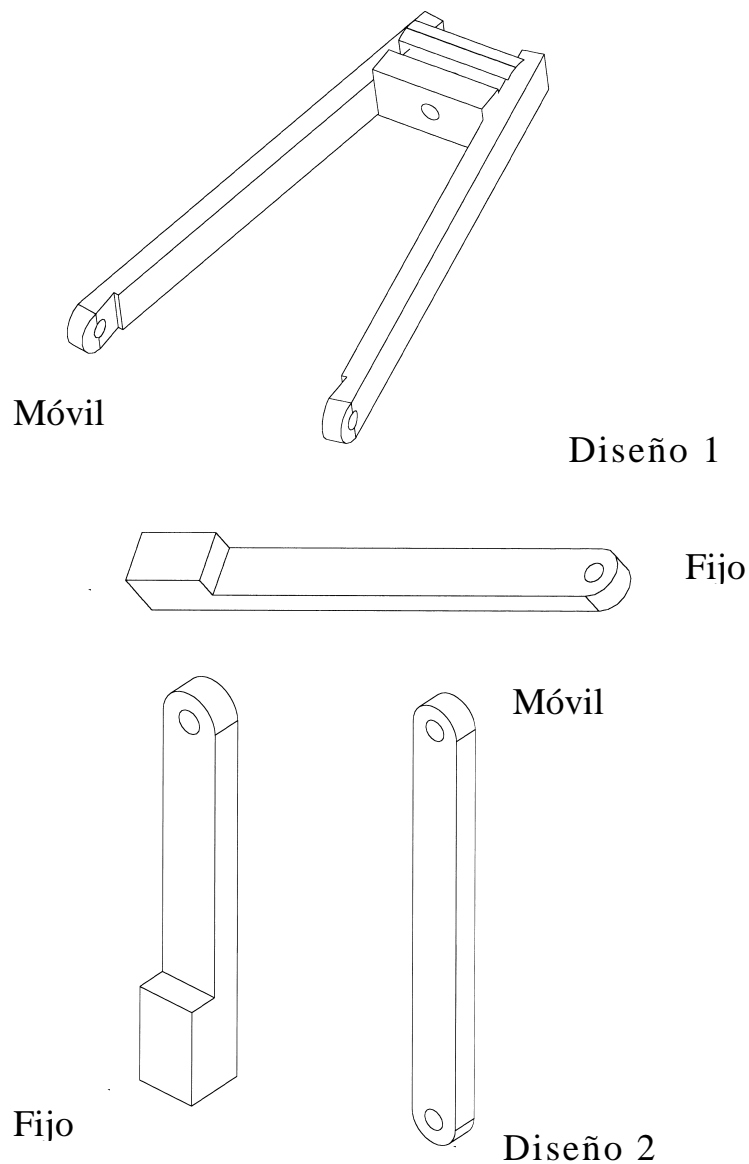
una distancia de 30 centímetros respecto del plano de corte.

Las figuras 3.1.22 del diseño 1 y la 3.1.23 del diseño 2 representan las tres vistas de las bancadas. Están formadas por un conjunto rígido que constituye la estructura fundamental de la máquina, sobre el que se montarán los elementos móviles y los soportes.

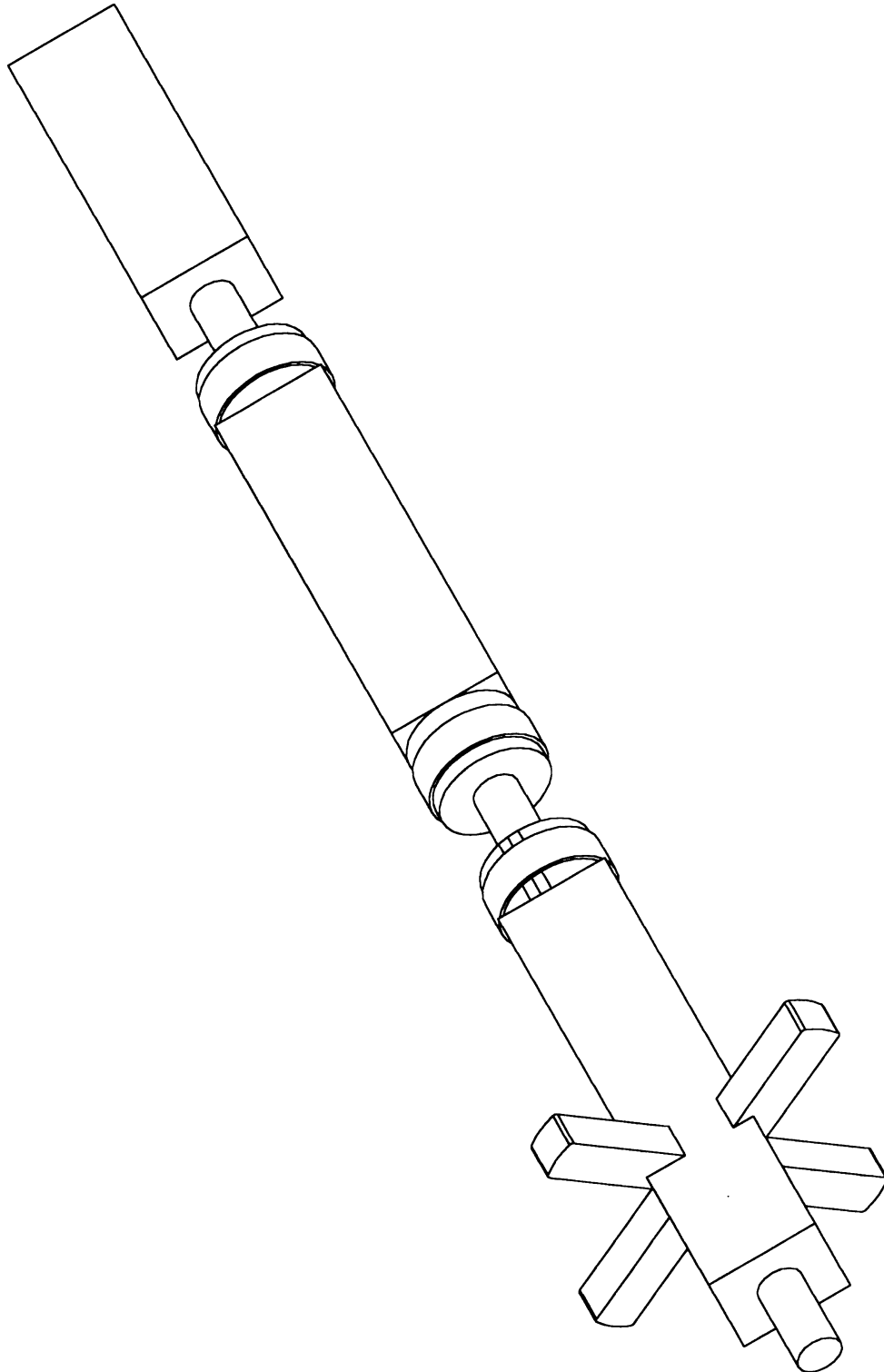
3.1.7.- Piezas de las máquinas en tres dimensiones.

Se ha realizado un despiece de las máquinas en tres dimensiones, con objeto de observar con más claridad sus formas y permitir verlas en perspectiva. La dinamización de los diseños necesita también de esta representación tridimensional.

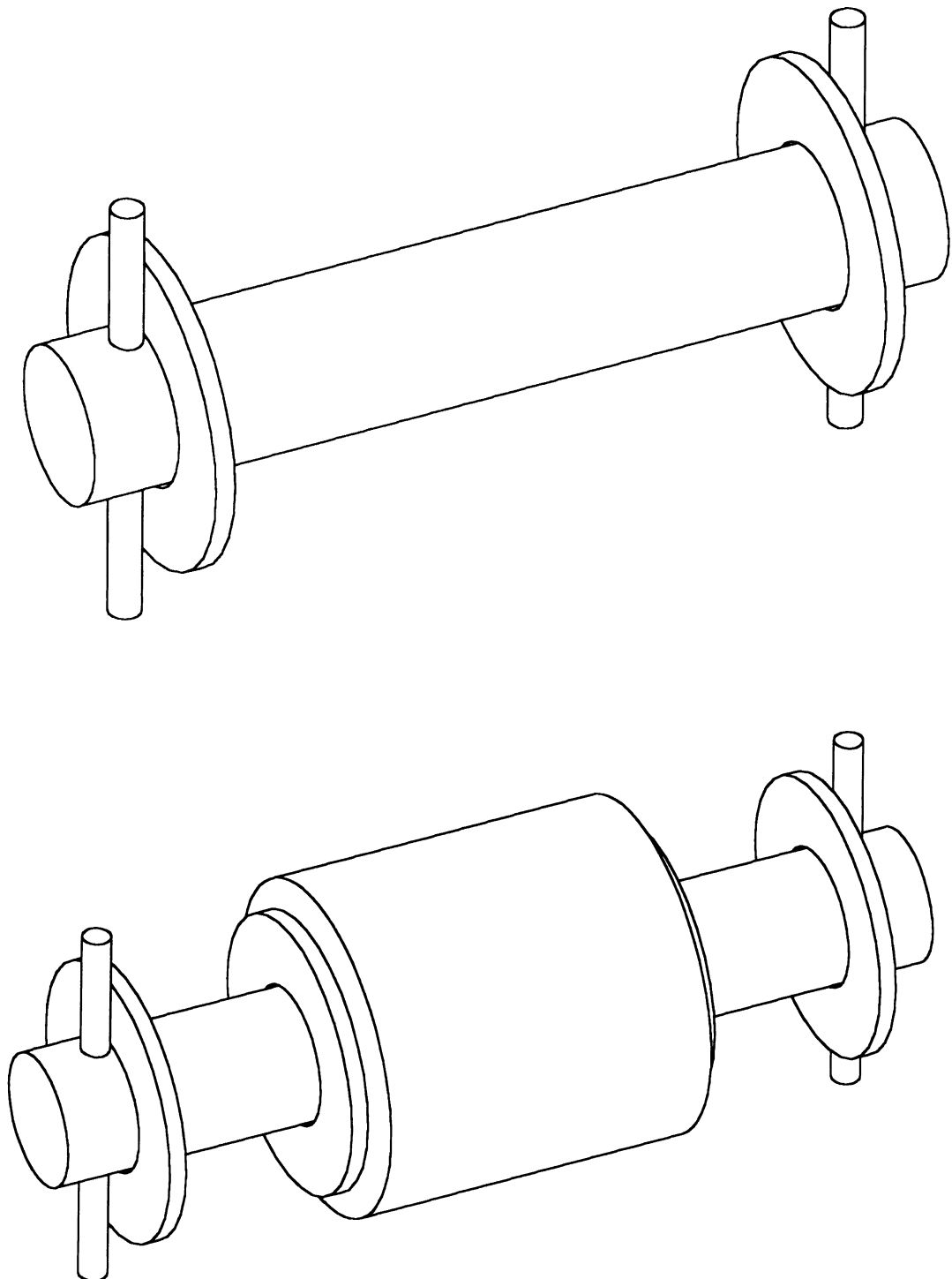
3.1.7.1.- Barras fijas y móviles.



3.1.7.2.- Eje motor con radios.

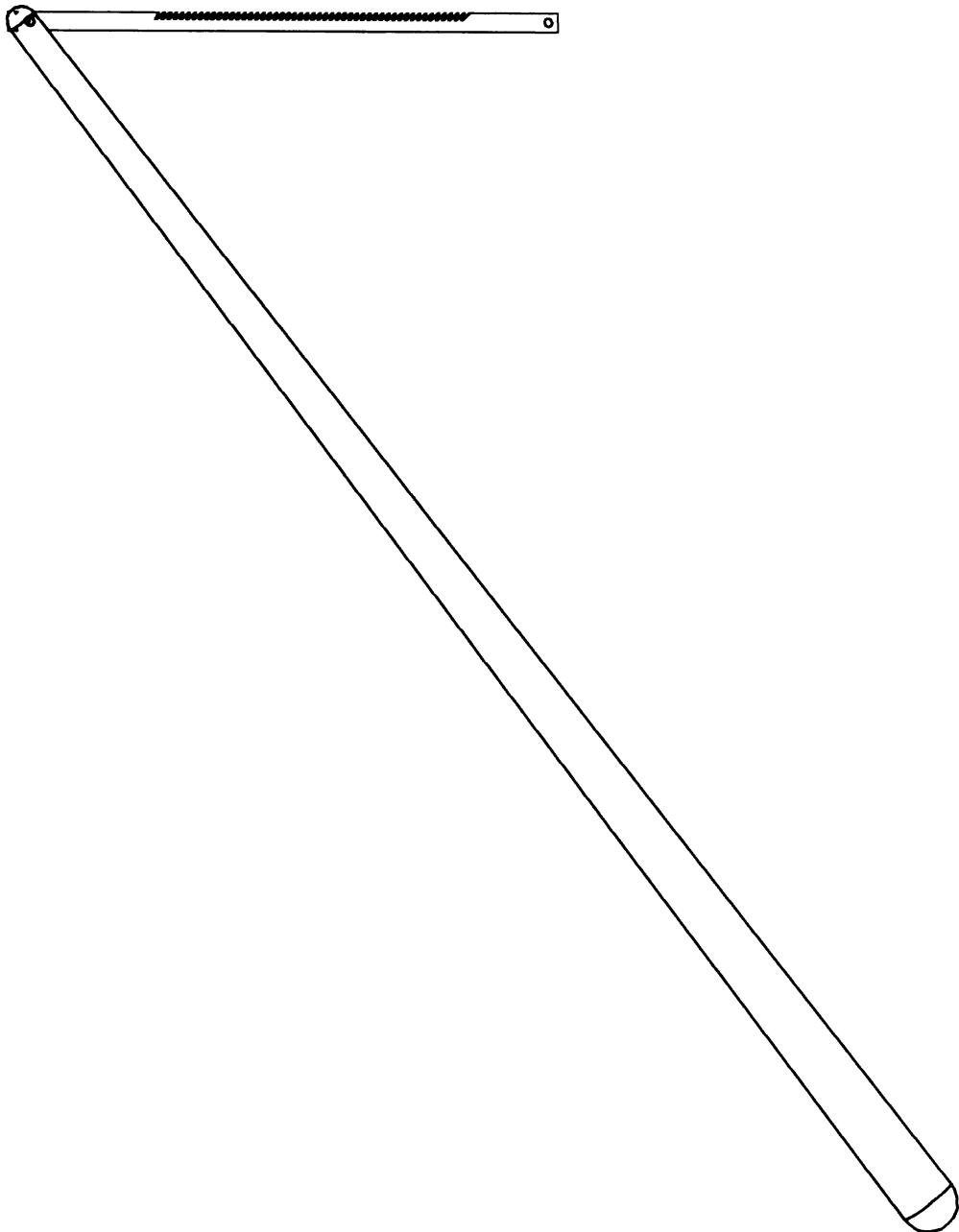


3.1.7.3.- Ejes de barras, de ballesta y de sierra.

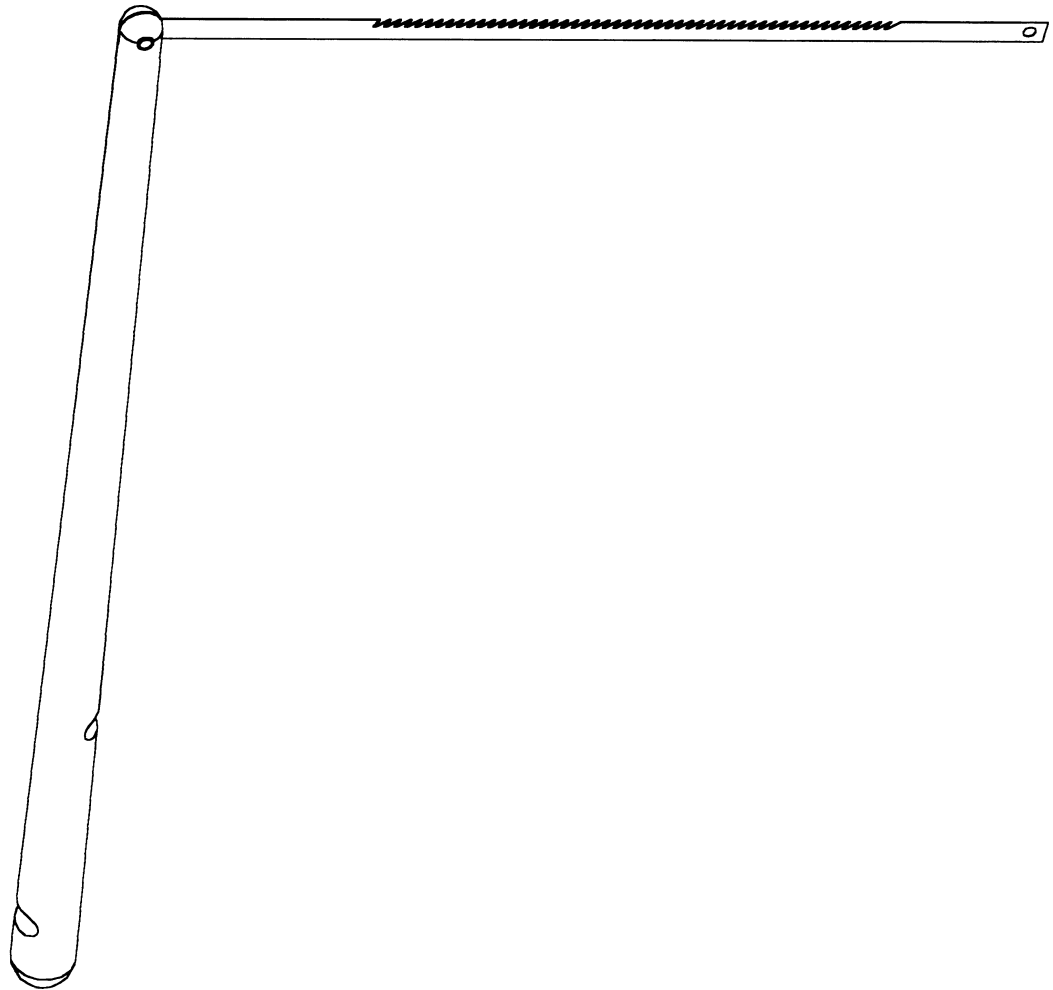


3.1.7.4.- Ballesta y sierra.

Diseño 1.

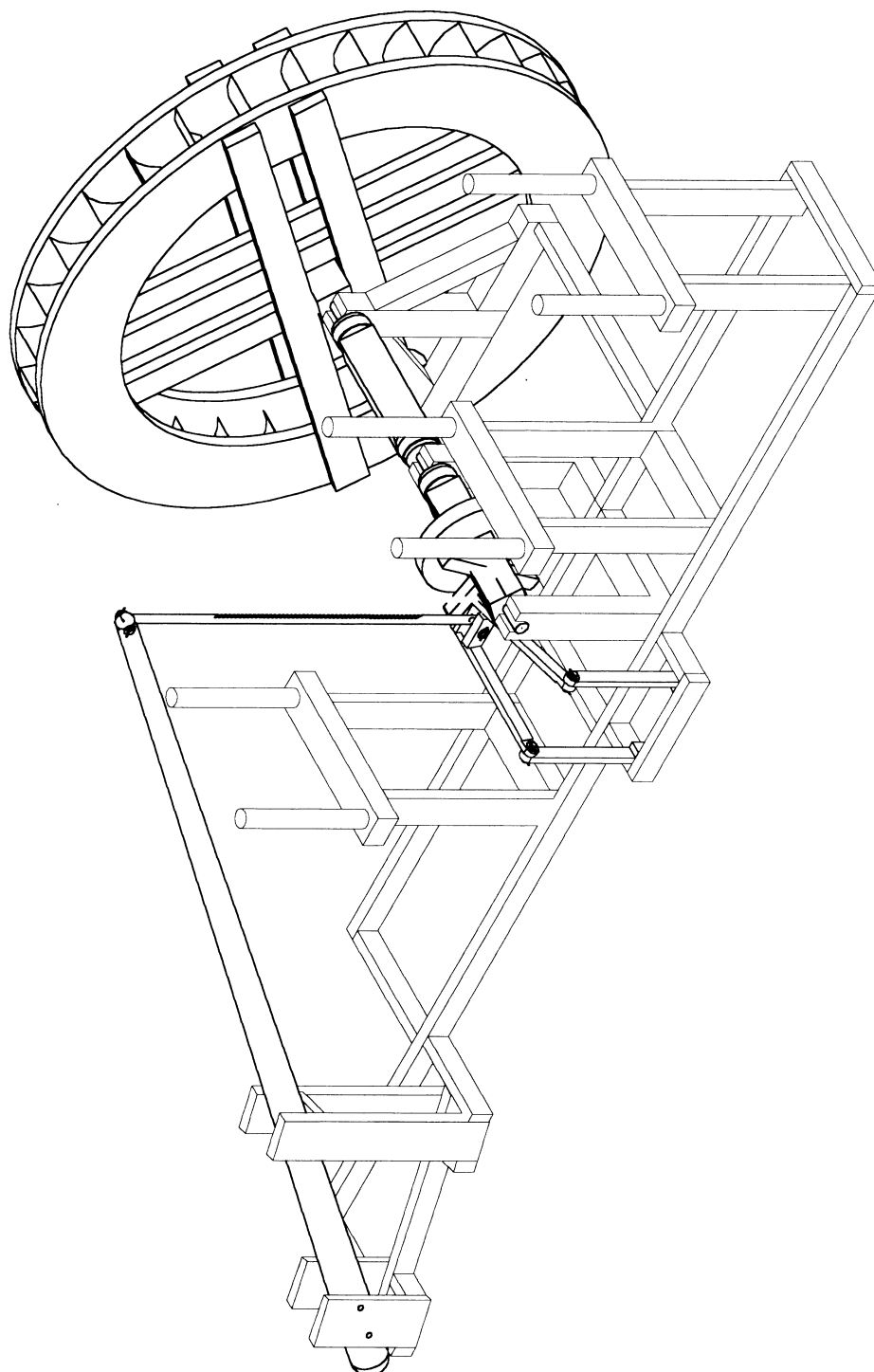


Diseño 2.

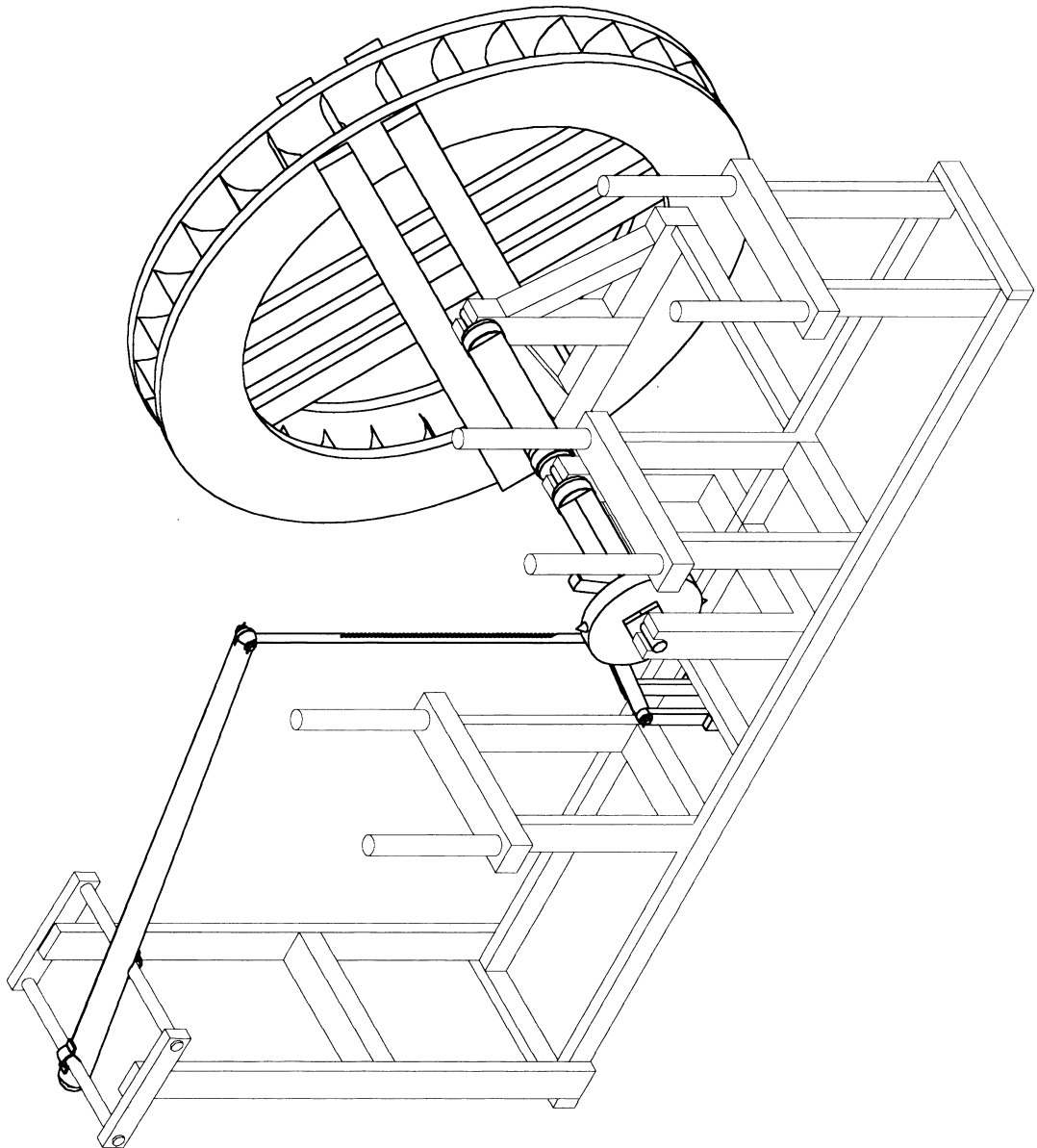


3.1.7.5.- Visión de conjunto de la Sierra hidráulica.

Diseño 1.



Diseño 2.



3.2.- BOMBA HIDRÁULICA DOBLE PARA MINA.-

La segunda máquina estudiada es un mecanismo para la elevación del agua de las minas que se menciona en la obra de George Agricola denominada “De re metallica”¹. El autor las denomina bombas de pistón y las representa y describe junto con otros sistemas de drenaje. Expone dos formas de accionamiento, a sangre o por medio de rueda hidráulica, y de éstas dos formas expone varias combinaciones para hacer posible la extracción de un mayor caudal de agua y a mayor profundidad.

De ellas se ha elegido un conjunto formado por dos sistemas simétricos que contiene cada uno dos bombas funcionando en serie, movidos por una rueda hidráulica.

3.2.1.- Antecedentes históricos.-

La obtención de minerales ha sido necesaria para el progreso de la humanidad, razón por la que la explotación de los yacimientos, es un trabajo realizado por el hombre desde el comienzo de la civilización.

En las explotaciones a cielo abierto la extracción de las menas dependía principalmente de la dureza de los filones y del transporte, pero cuando hubo que realizar pozos para llegar al mineral, a las dificultades anteriores se le unió la del agua que frecuentemente afloraba en las perforaciones.

¹ AGRICOLA, G. *De re metallica*, libro VI, pág. 195.

La eliminación del agua era imprescindible para poder realizar el trabajo, y cuando el achique no era suficiente para evitar la inundación, tenía que abandonarse la explotación. El autor describe al final del libro VI todos los inconvenientes que desde su punto de vista tenían las minas.

La solución de este problema ha sido asignatura pendiente en la minería hasta principios del siglo XVIII, motivo por el cual la profundidad de los pozos no superaban las tres o cuatro decenas de metros, dependiendo de la situación y del caudal del manto freático.

Se han mencionado en el capítulo 2, algunos de los mecanismos empleados para achicar el agua de las explotaciones en minas, aludiéndose como más conveniente la bomba impelente, mecanismo cuya eficacia solo era limitada por la potencia de los elementos motrices y por la altura de la elevación, debido, como se dijo, a que las tuberías tenían poca resistencia a la presión y una deficiente estanqueidad.

Para vencer esa limitación se diseñaron varios sistemas que pretendían eliminar, o al menos aminorar, los inconvenientes de presión y estanqueidad mencionados, pues, una vez superados, se podían realizar perforaciones mas profundas que permitieran aprovechar mejor las vetas de mineral. Uno de estos sistemas, con el cual se obtuvo una mejora en el achique, es el que se ha elegido para este estudio. En él se analizarán y corregirán los defectos que presentan la descripción y el dibujo.

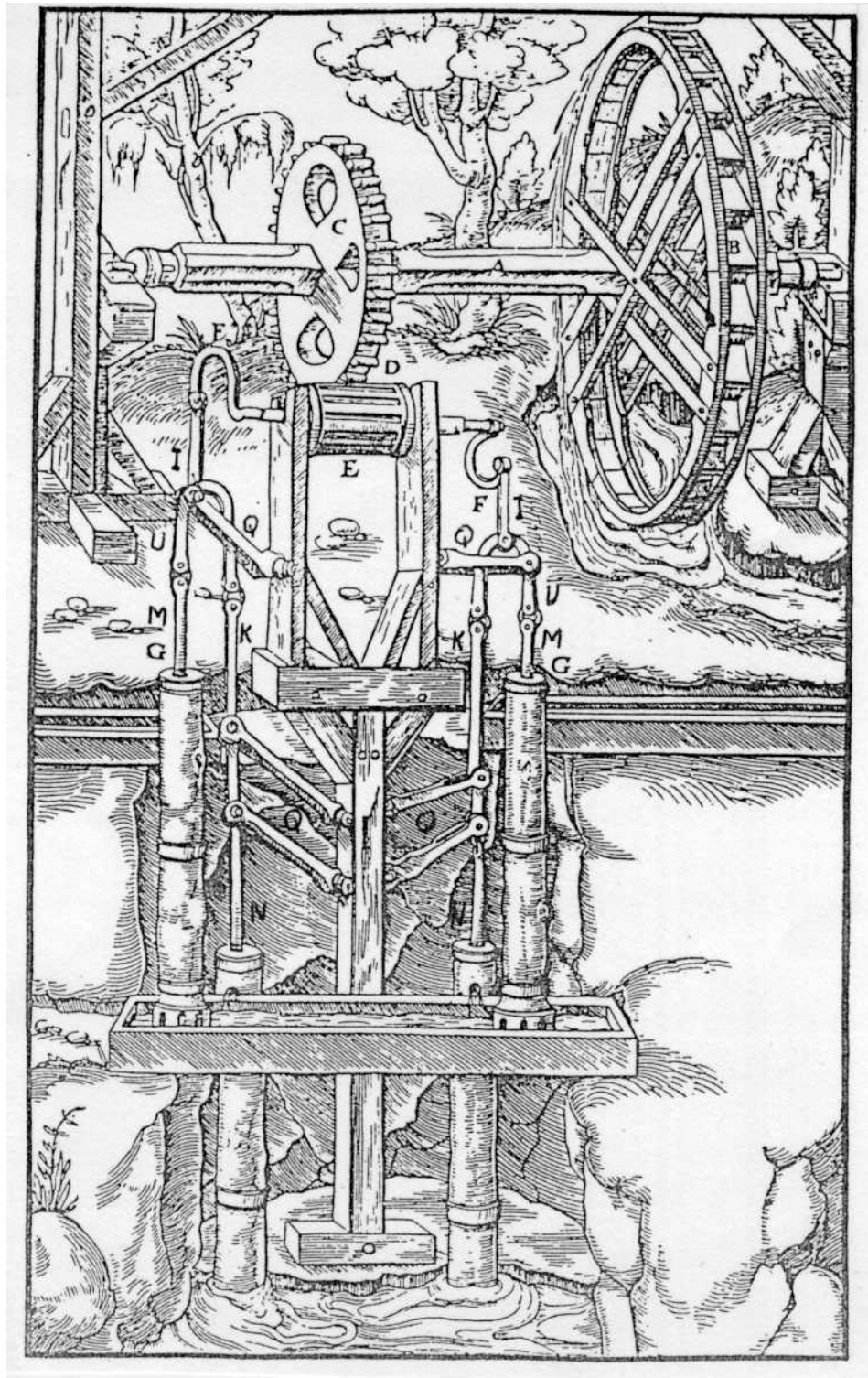


Figura 3.2.1. A: Eje superior.- B: Rueda hidráulica.- C: Tambor dentado.- D: Segundo eje. E: Tambor de muescas.- F: Manivelas.- G: Bombas de impulsión de agua.

La máquina representada en la figura 3.2.1 aparece dibujada en el libro VI de la obra antes mencionada de G. Agrícola. En los 12 libros de que consta todos referidos a la mina, señala las diferentes facetas geológicas de las explotaciones, los procesos jurídicos y técnicos que han de realizarse y los riesgos laborales de accidente y salud que la minería presenta.

Para recordar el contenido de la obra, se transcribe a continuación un breve resumen de él que el propio autor realiza en el prólogo y que dirige a los Duques de Sajonia. Dice así:

"Ya que ningún autor ha escrito de este arte en toda su extensión y ya que las naciones y los pueblos extranjeros no entienden nuestra lengua, y si la entendieran podrían aprender solo una pequeña parte del arte gracias a los autores que tenemos, he escrito estos doce libros De re metálica. De ellos, el primero contiene los argumentos que pueden utilizarse contra este arte y contra los metales y las minas y lo que puede decirse a su favor. El segundo libro describe al minero y se extiende en una disertación sobre la localización de las venas. El tercer libro trata de las venas, fibras y comisuras de las rocas. El cuarto libro explica el método de trazar los límites de las concesiones y describe también las funciones de los oficiales en las minas. El quinto libro describe la excavación para extraer el mineral y el arte del geómetra. El sexto libro describe las herramientas y las máquinas del minero. El séptimo libro trata del aquilatamiento del mineral. El octavo libro establece las reglas para la tostadura, trituración y lavo del mineral. El noveno libro explica los métodos de fundición. El décimo libro instruye a los estudiosos de las artes del metal en el arte de separar la plata del oro, y el plomo del oro y de la plata. El undécimo libro muestra la manera de separar la plata del cobre. El duodécimo libro, da reglas para la fabri-

cación de la sal, la sosa, el alumbre, el vitriolo, el azufre, el betún y el cristal."²

Al término del Libro VI cita las diversas causas que provocan el abandono de una mina que son por orden de importancia y resumidos, los siguientes:

- No producen metal o resulta improductivo por la profundidad a que está.
- La cantidad de agua que fluye, que no se puede desviar dentro de los socavones, ni extraer por la profundidad de los pozos.
- El aire nocivo que los propietarios a veces no pueden vencer.
- El veneno producido en lugares particulares, -si no está en nuestras manos extraerlos por completo o moderar sus efectos-.
- Los demonios asesinos y fieros, - ya que a estos no se les puede expulsar, ni se puede escapar de ellos -.
- Los apuntalamientos y entibaciones que se desprenden y derrumban.
- Las operaciones militares que reclaman a los mineros.³

Figura la extracción de agua de las minas como segundo motivo por el que una mina ha de ser abandonada, problema que

² AGRICOLA, G. *Opus citatus*, prólogo.

³ IBIDEM, libro VI, pág.226.

no se resolvería totalmente hasta principios del siglo XVIII, con la aplicación al bombeo de la máquina de vapor atmosférica.

Comenta el autor en su obra lo siguiente:

"Sucedee a menudo que el agua inunda la mina o el aire viciado la llena; los mineros prestan, por tanto, mucha atención a estos riesgos, casi tanta como a la excavación en sí, o al menos así deberían hacerlo. El agua de las venas y las vetas, y especialmente de las que no se está trabajando, debe ser drenada por las galerías y los socavones."⁴

Y continúa en la página siguiente:

"Hay dos clases de pozo, una ya descrita, de la que suele haber varios en cada mina, sobre todo si la mina tiene su socavón propio y es de mineral de calidad. Porque cuando el primer socavón se conecta con el primer pozo, se suelen excavar dos pozos más, o si el agua impide profundizar en éstos, a veces se hacen tres, de modo que uno haga de sumidero y se pueda continuar el trabajo en los otros. . . El pozo de la otra clase es muy profundo; a veces hasta de sesenta, ochenta o cien brazas. . . "⁴

"Sobre estos pozos se construyen máquinas para la extracción del agua; cuando están sobre el nivel del suelo, suelen ser movidas por caballos; las que están en los socavones suelen moverse por la fuerza del agua. Estos pozos se excavan cuando hay venas ricas de metal."⁴

La obra ha dado a conocer el complejo trabajo de la minería y la obtención de los metales, en una época en la que muy poco se publicaba distinto del arte y de las obras de religión. La descripción y los dibujos muestran con claridad el trabajo desarrollado y los útiles, herramientas y máquinas utilizados.

⁴ AGRICOLA, G.*Opus citatus*, libro VI, pág. 116 y 117.

Diversos temas sobre los mecanismos comentados en la obra de G. Agrícola son de nuevo tratados con la publicación dos siglos después de la Enciclopedia⁵, en la que los relativos a la minería y concretamente los referidos a la elevación y transporte de materiales y al bombeo del agua, son representados por Agrícola con más precisión. Entre los diversos tipos de máquinas para minas que se mencionan en el Volumen VI, "Planches", figura la que se estudia, aunque es un sistema de tres bombas en serie accionados a mano.

3.2.2.- Análisis del funcionamiento.-

El dibujo realizado por Agrícola expresa con claridad el funcionamiento de la máquina y, a diferencia del estudiado anteriormente de V. de Honnecourt, la forma de los elementos que componen la máquina queda perfectamente definida y la perspectiva con la que se representan permite interpretar su posición adecuadamente.

Los puntos de vista varían en algunos de sus elementos y la técnica, como corresponde a la época en la que los dibujos se han realizado, no define con precisión ciertos aspectos de la máquina. En esos años tan solo en la pintura artística, realizada por los grandes maestros, se representaba la perspectiva con realidad visual.

⁵ ENCICLOPEDIA DE DIDEROT Y D'ALEMBERT. Planches, volumen 6º.

La figura 3.2.2 es un modelo de tres bombas en serie con el mismo accionamiento por rueda hidráulica pero de solo un conjunto, también representado en la obra de Agrícola. En ella, el autor designa por su nombre y una letra a cada uno de los elementos que componen la máquina, los cuales se utilizarán en adelante para definirlos, exceptuando aquellos que en la figura 3.2.1 ya lo están, como son la rueda hidráulica -A-, el eje común -B-, la rueda motriz -C-, el piñón -E- y la manivela -F-.

Al eje -H- de la figura 3.2.2 lo denomina en la leyenda “juego de acoplamiento del eje”; en el estudio se denominará “eje” -E-. El elemento con forma de "U" invertida, no denominado con letra en ninguna de las figuras y que tampoco se menciona en la descripción, será la pieza -U-. El resto se mencionará de la forma que lo está en esta segunda figura. Estas letras se han puesto en la figura 3.2.1 para explicar con más facilidad su situación.

En el modelo que se ha de diseñar, en lugar de suponer dos bombas en cada rama, se ha optado por la serie de tres bombas en cada una de ellas, atendiendo a la descripción que el autor hace de la máquina, la cual se ha transcrito literalmente en el apartado 3.2.6.4.

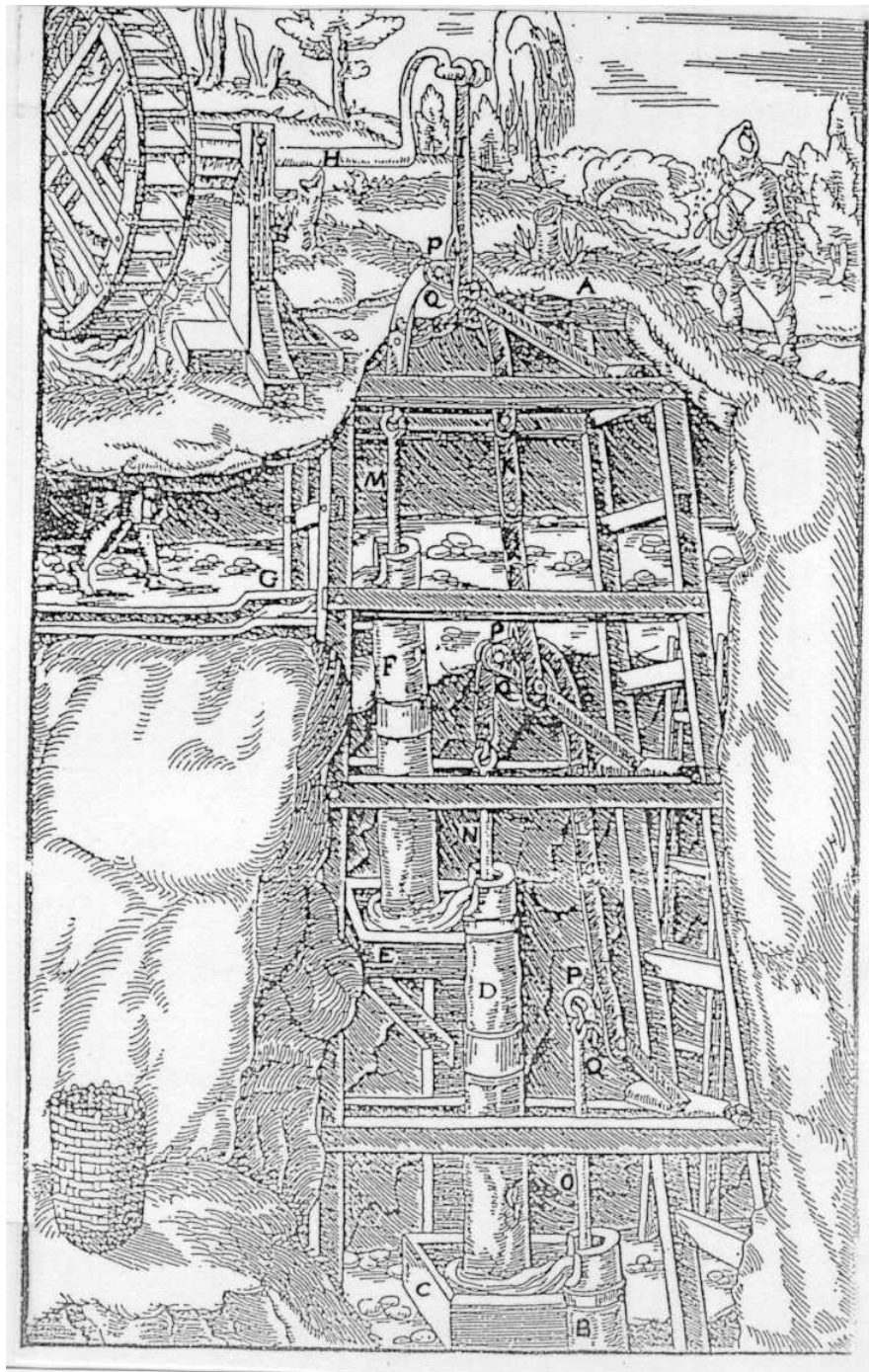


Figura 3.2.2. A: Pozo.- B: Máquina de impulsión de agua del fondo.- C: Primer depósito.- D: Segunda máquina.- E: Segundo depósito.- F: Tercera máquina.- G: Artesa o canchilón de desagüe.- H: Juego de acoplamiento del eje.- I: Vástago de la primera máquina.- K: Vástago de la segunda máquina.- L: Vástago de la tercera máquina.- M: Vástago del primer pistón.- N: Vástago del segundo pistón.- O: Vástago del tercer pistón.- P: Ejes pequeños.- Q: Estribos.

Este conjunto de bombas de pistón estaba movido por una rueda hidráulica -B- que por medio de un eje -A- solidario con ella y con otra rueda dentada -C-, transmitía el movimiento a un piñón o linterna -E-. El eje de -E- mueve, por medio de las manivelas -F-, dos vástagos de máquinas -I-, y éstos a dos piezas dobles en forma de "U" invertida que se han denominado -U-, de cuyos lados paralelos cuelgan cuatro vástagos, dos son los de pistón -M- que accionan las bomba -F- situadas a menor profundidad y los otros dos son los vástagos de máquina -K-. Los vástagos -K-, de más longitud, van unidos a las segundas piezas -U- situadas a más profundidad, solo visibles en la figura 3.2.2, de las cuales cuelgan los vástagos de pistón -N- de las bombas intermedias -D-, y los vástagos de máquina -L-. De estos últimos vástagos de máquina cuelgan los dos de pistón -O- de las bombas inferiores -B-.

En la figura 3.2.2 se representan los ganchos de madera o estribos -Q- sujetos a la estructura del pozo, que se unen a las piezas -U- para mantenerlas en un plano vertical. Estas piezas en la figura 3.2.1, tienen la misma función pero van sobre la estructura de la máquina.

Las bombas inferiores -B- y -D- de la figura 3.2.2, elevan el agua a sendos depósitos intermedios -C- y -E-, desde donde aspiran las superiores, vertiendo el agua la última bomba -F- a un canal exterior. La serie de bombas podría aumentarse con

otras hasta agotar la potencia de la fuente de energía disponible, permitiendo achicar el agua a mayor profundidad.

Con este sistema se acortan los tramos de conductos de elevación que en la época solo soportaban presiones comprendidas entre 10 y 15 metros máximos, debido principalmente a la poca estanqueidad de las uniones. Con referencia a esto, el autor dice:

"Cada bomba está formada por dos longitudes de tuberías, cada una de las cuales tienen doce pies de largo, siendo de siete dedos el diámetro interior."⁶

Los valores corresponden a 3,36 metros de longitud de cada tramo de tubería y 12,6 centímetros de diámetro de diámetro interior.

Se han realizado dos tipos de sistemas denominados diseño 1 y diseño 2, en los que solo varían el sistema de transmisión propuesto. En el primero se sustituyen los ganchos de madera -Q- por una pieza fija que hace de guía, y en el segundo se elimina la pieza -U- permaneciendo los ganchos de madera. Ambos elementos, ganchos de madera y piezas -U- conjuntamente, desde nuestro punto de vista, no permiten el funcionamiento.

3.2.3.- Deficiencias observadas y soluciones propuestas.

Se observan en el dibujo algunas deficiencias que imposibilitarían o dificultarían el movimiento y, como en el caso de la sierra hidráulica, se expondrán para a continuación describir

⁶ AGRICOLA, G.*Opus citatus*, libro VI, pág. 192.

dos de las varias soluciones que harían posible el funcionamiento. A partir de ellas se diseñarán modelos virtuales, de aspecto semejante al de la figura 3.2.1, que funcionarían correctamente, tal como lo hiciera la máquina original, manteniendo las dimensiones de los elementos de la máquina, iguales a las descritas por el autor, cuando ello sea posible. Estas deficiencias observadas en las figuras son:

- a).- El enganche de la manivela -F- con el vástago de máquina -I-, se hace en el mismo plano, lo que no permite el giro.
- La unión ha de realizarse en un tramo de pequeña longitud prolongación de la manivela -F- que sea paralelo al eje del piñón -E-, a la que se unirá el vástago -I- por medio de un taladro practicado en el extremo de la cara mayor. El mencionado vástago puede girar libremente si se sitúa en un plano paralelo más alejado del piñón que el formado por la manivela -F-.
- La solución propuesta se representa en la figura 3.2.2, y la describe el autor así, refiriéndose a la manivela denominada -H- en esta figura:

"a partir de aquí se curva hasta una altura de un pie, como el cuerno de la luna, después de lo cual de nuevo se prolonga recto durante un pie; de esta forma sucede que esta última porción recta a medida que gira en una órbita, se

hace alternativamente un pie mas alta y un pie mas baja que la primera parte recta."⁷

- La prolongación del eje no se ha dibujado de un pie, sino lo necesario para sujetar el vástago de máquina -I-. La medida del texto era, con toda probabilidad, la utilizada en las manivelas de los tornos movidos a mano.

b).- El plano definido por el giro de la manivela -F- y por el movimiento del vástago de máquina -I-, es normal al que genera el movimiento de giro del “gancho de madera” o “estribo” -Q-, impidiendo esta disposición el funcionamiento,

- Si la unión entre el vástago -I- y el estribo -Q- no dispone de dos grados de libertad situados en planos diferentes y formando un diedro de 90°, la transmisión del movimiento no es posible. Necesitaría una unión por medio de una argolla de tamaño suficiente para permitir el desvío, semejante a la representada en la figura 3.2.2 para la unión de las piezas -U- con las barras de pistón -M- y -N-. Esta unión con argollas presentaría inconvenientes al funcionamiento debido a los esfuerzos descentrados, que ocasionarían inclinaciones en los vástagos y golpeteo en los cambios de sentido de la fuerza y, además, necesitaría de peso suficiente en los elementos para hacerlos bajar.

⁷ AGRICOLA, G.*Opus citatus*. libro VI, pág. 191.

- Se propone en el diseño 1 realizar una unión mediante un bulón girando, para ello, 90° la pieza -U-. Sería semejante a la representada en la figura 3.2.2 en la unión del estribo -Q- y la pieza -U- por medio del "pequeño eje" -P-. Con esta disposición la manivela y los vástagos definen planos paralelos con sus evoluciones que admiten el movimiento.
 - La segunda interpretación que se sugiere en el diseño 2, elimina la pieza -U- y la sustituye por dos vástagos -I- de largo mayor, uno se unirá al vástago de pistón -M- y el segundo al vástago de máquina -K-. El gancho de madera -Q- se gira 90° para situarlo paralelo al plano que define el movimiento del vástago -I-.
- c).- El momento resultante que genera la diferencia de pesos en los brazos de las piezas -U-, originaría en ella un giro dificultando el desplazamiento.
- En el diseño 1 se propone una pieza fija para sustituir al estribo -Q-, pieza que irá provista de dos taladros rectangulares a través de los cuales se deslizan los brazos de la pieza -U-, impidiéndose el giro que le ocasiona la diferencia de pesos. Además el taladro de sujeción de la primera pieza -U- al vástago -I- y de la segunda al -K-, se prevé desplazarlos de forma que el momento sea nulo.

- El doble vástago de madera -Q- que aparece en la primera figura 3.2.1 unido al accionamiento -K- de la segunda bomba, eliminaría el inconveniente, pero persistirían los defectos apuntados en b) -de planos de movimientos normales- y a continuación en d) -de desplazamiento lateral-.
 - El diseño 2 dispone de dos vástagos -I- y por tanto la diferencia de pesos no le afecta al funcionamiento.
- d).- En la figura 3.2.1 la unión de la manivela -F- y el vástago -I-, no puede estar ajustada dado que el estribo -Q- en su movimiento lo desplaza en sentido longitudinal al eje -E-. Efecto similar producen los estribos -Q- inferiores sobre los vástagos -N-, que accionan los pistones de las bombas inferiores -D-, empujándolos hacia la pared de los cilindros. De igual forma desplazarían a los vástagos de máquina -K- y -L- de la figura 3.2.2.
- Este defecto queda corregido con las soluciones dadas en b). La sustitución de los estribos -Q- por la pieza fija con taladros rectangulares, elimina el desplazamiento lateral de todos los elementos a los que se unen. La eliminación de la pieza -U- permite el desplazamiento en los ejes de unión, sin variar transversalmente los vástagos de pistón -M- y -N-.
- e).- Los ganchos de madera -Q- son de distinto tamaño en la figura 3.2.1, menores los superiores que los inferiores,

lo que produce un desplazamiento desigual de las piezas -U- y de los vástagos de pistón -K-.

- En el diseño 1 el desplazamiento transversal de la pieza -U-, se elimina por las soluciones dadas en a) uniendo los elementos con bulón y girando las piezas -U- 90°, y en b) sustituyendo los ganchos de madera -Q- por unas piezas fijas con taladros rectangulares-. Los vástagos de pistón -M- y -N-, realizarán el movimiento vertical guiado por el taladro practicado en la tapa superior del tubo final de las bombas -F- y -D-, a través del cual pasan al interior. A diferencia del estribo -Q-, el nuevo soporte no tendría movimiento, aunque será denominado con la misma letra.
 - En el diseño 2 los ganchos de madera tendrán la misma dimensión, aunque en la disposición que se propone la diferente longitud no afectaría al funcionamiento. De la misma forma que en el caso anterior, los taladros de la tapa de las bombas sirven de guía a los vástagos de pistón.
- f).- Da la sensación en la perspectiva de la figura 3.2.1 que las bombas están en el mismo plano del eje del piñón -E-, lo cual obligaría a los cuerpos de las bombas inferiores a atravesar los depósitos intermedios, creando problemas de estanqueidad.

- El giro de 90° dado a las piezas -U- en el diseño 1 y a los ganchos de madera -Q- en el diseño 2, propuestos como solución en b), elimina este inconveniente, pues todos estos elementos definen dos planos perpendiculares al eje del piñón -E-, que separa los tubos de las bombas de los depósitos.
- No obstante, la solución adoptada en ambos modelos de girar 90° los depósitos y poner uno para cada bomba eliminaría el inconveniente.

g).- Los tubos se representan en la figura 3.2.1 cerrados en su parte alta, con un taladro que permite el movimiento vertical de los vástagos de pistón. El movimiento en sentido longitudinal al eje que les provocan los estribos -Q-, inconvenientes descritos en d) y e), haría rozar la barra contra el taladro, imposibilitando el movimiento.

- La solución dada en c), permite que las bocas de los tubos puedan cerrarse dejando un taladro para el paso del vástago de pistón que, a la vez, les serviría de guía, como se dijo en e).
- La tapa evita que el agua rebose por el tubo, canalizándola a los depósitos o al cangilón de desagüe -G-.

h).- Se representa en la figura 3.2.1 la unión del vástago -I- con la pieza -U- de distinta forma en ambos lados, con lo cual se tendrían resultados diferentes en el movimiento de la máquina.

- Esto se debe, sin duda, a un defecto en el dibujo, por tanto, en el modelo propuesto se representan las uniones de los vástagos de igual forma en ambos casos, según las soluciones para esta unión dada en b).
- i).- La posición de las manivelas -F-, solidarias al eje del piñón -E-, aparentan en la perspectiva estar desfasadas 90° , lo cual haría, que en una cuarta parte del recorrido, todas las bombas estarían en movimiento de impulsión, precisando el mecanismo en ese tiempo de doble potencia.
- Igual que en el caso anterior, puede ser un defecto de la perspectiva. En el modelo propuesto las manivelas se representan desfasadas 180° , con objeto de no sumar esfuerzos.
- j).- En la figura 3.2.1 se supone que para dibujar con claridad la máquina, se sitúan las bombas próximas a la superficie y con largos apropiados a las dimensiones del papel, de ahí que la columna que soporta todo el mecanismo tenga unas dimensiones aceptables. Pero cuando la profundidad a la que están es de 14 metros con dos bombas en serie, que pasa a 21 metros en el caso estudiado, no sería práctico realizar este montaje con un pilar central.
- De hecho, la figura 3.2.2 no presenta este tipo de sujeción, sino que se apoya en la estructura del pozo (figura 3.2.3), si bien este diseño no es doble. A los modelos propuestos se les ha dotado de una bancada apoyada en

la boca de la perforación que soporta el mecanismo. Los tubos de las bombas y los soportes guía o los estribos -Q- inferiores, según el diseño, se sujetarán a las traviesas de la estructura de entibación del pozo. Los dos soportes o estribos superiores irán sobre la bancada. La sujeción se realiza sobre los tablones de muro -A- de la estructura de entibación del pozo, representada en la figura 3.2.3 que define la forma de ésta y la denominación de los componentes.

De la misma forma que ocurre en la sierra hidráulica, no todos los defectos descritos impiden a la máquina funcionar; algunos de ellos solo disminuirían el rendimiento. No obstante, el número de aquellos nos permite pensar en una forma de la máquina semejante a la representada, pero con las variaciones que los elimina.

La representación que hace Agrícola es más descriptiva que la de Honnecourt y, por ello, los defectos que se observan no son tan negativos, ni sus resultados tan desfavorables. Por esta razón las soluciones propuestas a las anomalías observadas, hacen al modelo virtual con un mayor parecido a la máquina representada, ya que al dibujo tan solo le falta algo de concreción en algunas descripciones y la disposición adecuada de algunos de sus elementos.

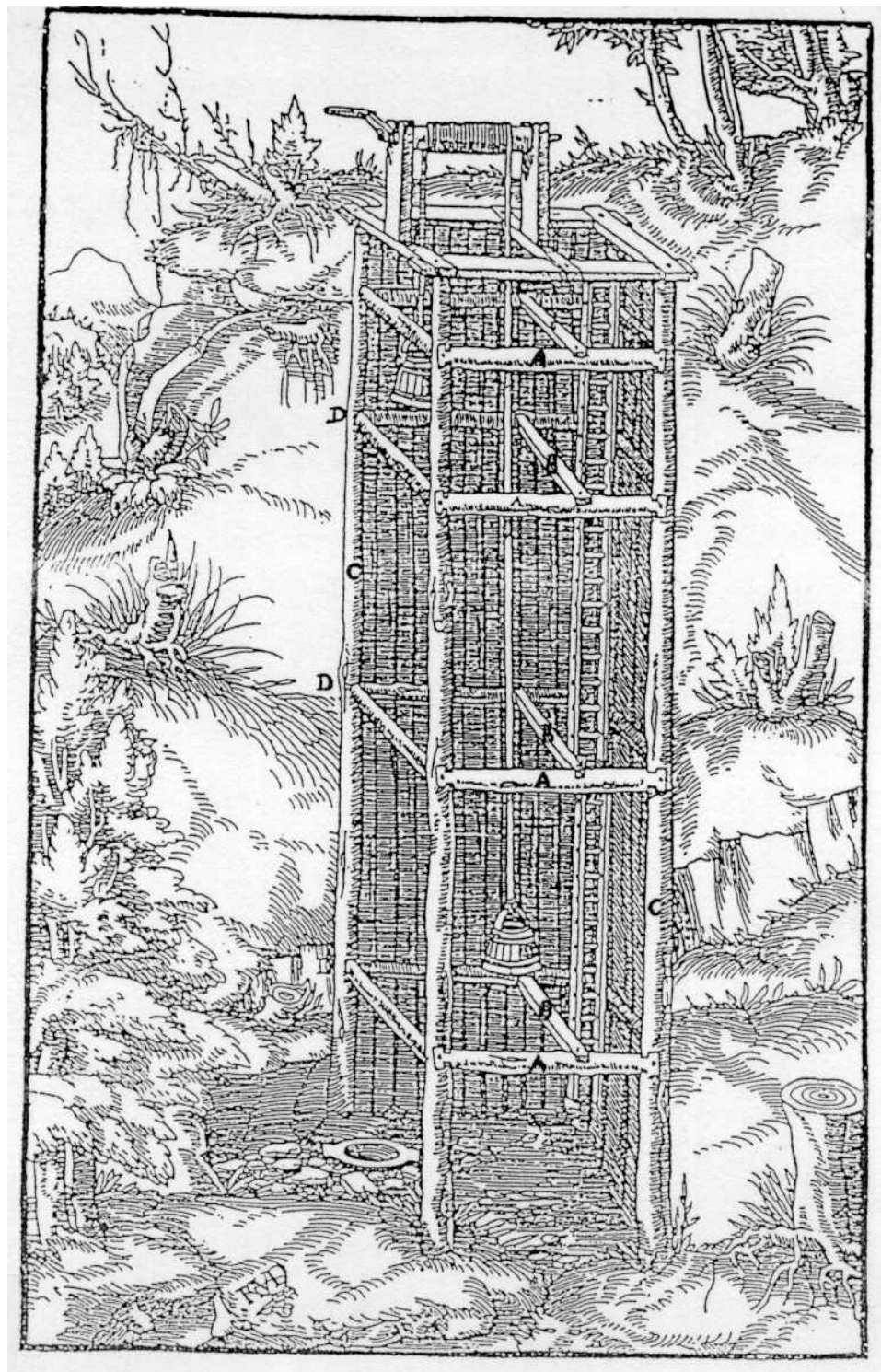


Figura 3.2.3. A: Tablones de muro.- B: Traviesas de separación.- C: Postes maestros.- D: Tablas de revestimiento.

3.2.4.- Verificación de las deficiencias del dibujo original.-

A continuación se analizan, los efectos que producirían las anomalías observadas en el dibujo que obligan a realizar modificaciones para que pueda ser el modelo funcional.

3.2.4.1.- Desplazamiento en pieza -U-, por gancho -Q-.

El desplazamiento de estas piezas se produce por el arco que recorren los ganchos de madera -Q- unidos a ellas, ya que las desvían, al ser normales los planos que forman sus movimientos. La figura 3.2.4, representa en forma esquemática el desplazamiento que se produciría, según las dimensiones que el autor da a -Q- en el siguiente fragmento del texto. Dice así:

"En los "ganchos" se coloca un pequeño eje redondo que tiene un pie y medio de largo y dos cuartas de grueso. Los extremos están rodeados por bandas de hierro para evitar que los soportes de hierro puedan girar en los casquillos de hierro de la madera, saliéndose fuera al deslizarse. Desde este pequeño eje, los ganchos de madera se extienden dos pies, con una anchura y grosor de seis dedos; hay tres cuartas de distancia de uno a otro y tanto los laterales interiores como los exteriores están cubiertos con placas de hierro."⁸

Las dos primeras frases que se transcriben del texto no son claras, la primera por el grueso del pequeño eje, la segunda porque da la impresión de una interpretación inapropiada de la máquina por el autor, o que sea la causa de los problemas que encontró el traductor, en ciertas expresiones no existentes en el latín clásico. Éste hace mención a ello en la "Nota a la primera

edición” de la obra e indica que hubo de solucionar las dudas haciendo una redacción intuitiva del significado. Las frases tercera y cuarta sí definen con claridad el elemento y su sujeción, aunque no parece tampoco apropiada la distancia que da entre los ganchos.

Con la longitud de ganchos que el párrafo anterior define y el recorrido de los émbolos, la desviación se representa en la figura 3.2.4.

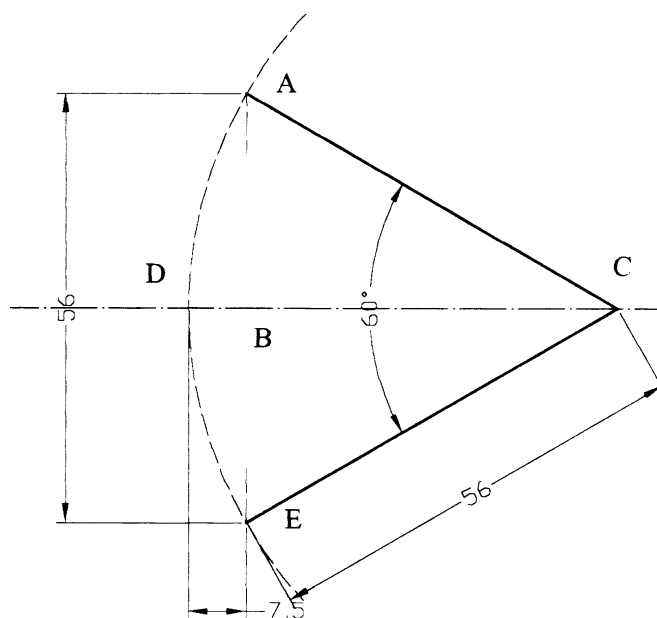


Figura 3.2.4.

El estudio analítico coincide con el gráfico, y así tomando como base los valores que se derivan de la figura, se obtiene:

Recorrido del émbolo. 56 cm

Longitud del gancho. 56 “

⁸ AGRICOLA, G. *Opus citatus*, libro VI, pág. 191.

$$\begin{aligned}\operatorname{sen} \beta &= \frac{\overline{AB}}{\overline{AC}} = \frac{56/2}{56} = 0,5 \quad \Leftrightarrow \quad \beta = \operatorname{arc. sen} 0,5 = 30^\circ \\ \overline{DB} &= \overline{DC} - \overline{BC} = \overline{DC} - \overline{AC} \times \cos \beta = 56 - 48,5 = 7,5 \text{ cm.}\end{aligned}$$

Para absorber éste desvío y hacer posible el funcionamiento, las uniones tendrían que hacerse con grilletes. Habría entonces, como antes se dijo, deficiencias en el funcionamiento y sería necesario peso suficiente en los elementos para producir el movimiento del pistón hacia abajo.

3.2.4.2.- Desvío de pieza -U- sin desplazamiento de -I-.

Si se supone que el desplazamiento lateral del vástago de máquina -I- es nulo debido a su unión con la manivela -F-, y además que el vástago de pistón -M- de la figura 3.2.2 pudiera desplazarse por no estar cerrado el extremo del tubo de la bomba, la desviación sería solo de la pieza -U- con el resultado de la figura 3.2.5.

En el detalle 1 la unión del estribo -Q- con la pieza -U- se realiza en un taladro -a- próximo a la cruceta. El funcionamiento sería imposible debido a que la distancia máxima desde este taladro al eje de desplazamiento es de 37,6 centímetros, menor 3,3 centímetros que lo que se desplaza la cabeza del estribo respecto de este eje en el punto máximo de separación. La posición extrema se marca a trazos en el dibujo siendo imposible el movimiento a partir de ese punto.

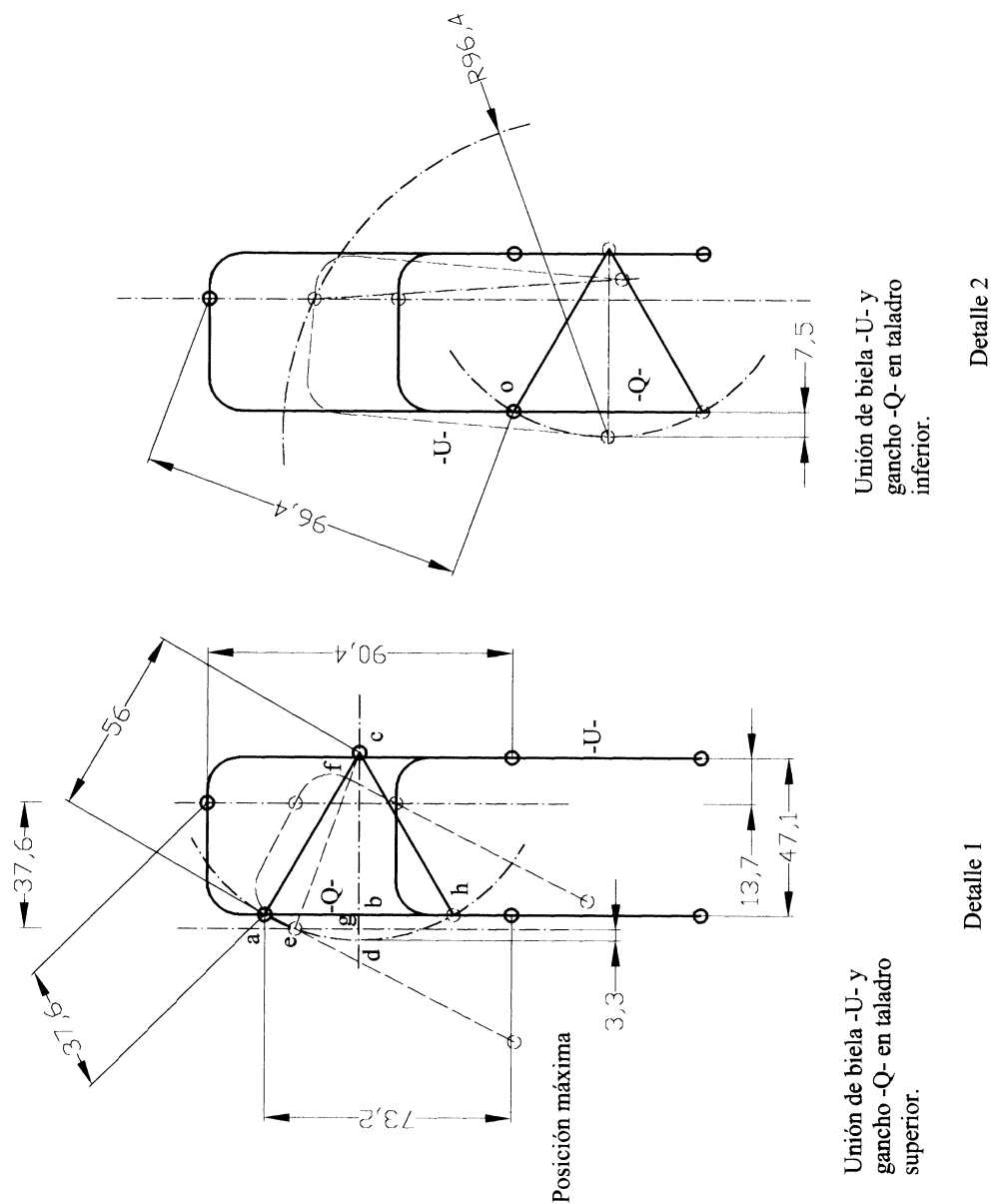


Figura3.2.5

El cálculo analítico da el mismo resultado. Las letras que definen cada punto en el detalle 1 se han puesto minúsculas, pa-

ra distinguirlas de las mayúsculas que nombran los elementos de la máquina. Los valores son:

$$cd = 56 \text{ cm.} \qquad fg = 37,6 + 13,7 = 51,3 \text{ cm.}$$

$$cb = cd - db = 56 - 7,5 = 48,5 \text{ cm.}$$

$$cf = cb - bf = 48,5 - 47,1 = 1,4 \text{ cm.}$$

$$dg = cd - fc - fg = 56 - 1,4 - 51,3 = 3,3 \text{ cm.}$$

El detalle 2 representa la unión de la cabeza del gancho de madera -Q- en el taladro inferior de la pieza -U-; así el desplazamiento, de 7,5 centímetros, coincide con el de la figura 3.2.4, siendo posible el funcionamiento si se realizan las uniones mediante grilletes, con lo cual aparecerán los inconvenientes antes apuntados.

3.2.5.- Descripción del mecanismo propuesto.-

Las soluciones adoptadas no son las únicas posibles, aunque son las que se han observado con aspecto sensiblemente igual al modelo y con las mismas dimensiones dadas por el autor, si no se han encontrado inconvenientes para ello.

El dibujo de la figura 3.2.1 representa la unión de la manivela -F- con el vástago -I-, y la de éste con la pieza -U- con bulones o pasadores, -aunque veladamente-, no apreciándose la forma de las cabezas. En la figura 3.2.2 la forma de unión de estos mismos elementos sí aparece claramente representada con bulones, denominados en la leyenda "pequeños ejes" -P-. La solución que se propone en todos los casos de uniones es utili-

zar bulones fijados con pasadores, sistema igualmente eficaz para la elevación que para la bajada de los émbolos.

Los ganchos de madera o estribos -Q-, aparecen dobles en ambas figuras para permitir el paso entre ellos de la pieza -U- de doble salida, y las uniones representadas en cada una de ellas son semejantes a las reseñadas anteriormente.

Se ha proyectado utilizar la pieza -U- en parejas y realizar la unión mediante bulón con los vástagos -M- y -K- con objeto de facilitar y centrar el esfuerzo, forma que se asemeja a la representada en la figura 3.2.2 para la unión del vástago -I- con el estribo -Q- -(éste también aparece doble en la figura)- y de éste con la pieza -U- inferior.

Las uniones entre la pieza -U- y los vástagos de pistón -M- y -N- de las bombas -D- y -F-, se representan en ambas figuras con anillos o eslabones que, como anteriormente se dijo, no facilitarían el empuje hacia abajo de los pistones. En parte, la argolla absorbería el esfuerzo transversal que le produciría el gancho -Q-, admitiendo el movimiento descendente con limitaciones.

La solución dada al modelo es la unión mediante bulón de los vástagos de pistón de las cuatro bombas superiores con la doble pieza -U-, y acodar en ángulo recto el extremo de los dos últimos vástagos de pistón -O- de la figura 3.2.2, para alojarlo en el taladro del vástago de máquina -L-. Estas soluciones se representan en la figura 3.2.11.

En el diseño 2 los ganchos de madera son dobles como figuran en el modelo, uniéndose en él los vástagos -I- y -K-. El gancho doble absorbe el momento de giro que produce el tiro descentrado de los dos vástagos. El mismo eje contiene la pareja de ganchos de ambos sistemas de bombas. La unión de los vástagos de pistón -M- y -N- con los de máquina -I- y -K-, se hacen con final acodado.

El conjunto en ambos diseños tendría dos sistemas de planos verticales; uno está formado solamente por el que contiene al eje del piñón -E-; otro, normal a éste, estaría compuesto por dos planos paralelos, definidos por los movimientos de las manivelas, de las piezas -U-, de los vástagos de máquinas y de pistón y de los propios pistones.

3.2.6.- Diseño de los componentes de las máquinas.

Como para el caso de la sierra hidráulica, se procede a realizar el diseño de los diferentes componentes del mecanismo a partir de las soluciones adoptadas. Las medidas y formas de todos ellos se ajustan en lo posible a las definidas por el autor en su obra, y los no definidos o los que resulta necesario modificar, se han diseñado de manera que se asemejen lo máximo posible a los que aparecen en el dibujo.

Las dimensiones generales que tenían las bocas de pozos de minas, están descritas en la obra⁹, dando:

⁹ AGRICOLA, G.*Opus citatus*, libro V, pág. 103.

Largo. . . . 2 brazas equivalentes a 3,66 metros.

Ancho . . . 2/3 “ “ a 1,22 “

Profundo. 13 “ “ a 23,79 “

aunque menciona algunos de ellos que llegaron a 80 y 100 brazas equivalentes a unos 183 metros.

3.2.6.1.- Diámetro y dientes de rueda motriz y piñón.

A falta de medidas concretas, se ha supuesto que el piñón -E- dé tres vueltas por cada una de la rueda motriz -C-, y que el diámetro exterior de ésta sea de 120 centímetros. La sección del diente de la rueda motriz se ha supuesto semicilíndrica y unida a la superficie externa de la rueda por un paralelepípedo de sección rectangular.

El piñón es de tipo linterna y está formado por dos placas cilíndricas laterales de pequeño espesor que soportan los dientes.

Los ejes se dibujan con las ruedas incorporadas. El eje de la rueda motriz -A- que lo une a la rueda hidráulica -B- tiene seis pies de largo y uno de grosor, según descripción del autor. Este último valor se ha tomado para el diseño, adoptando la mitad de este grosor para el eje del piñón. La figura 3.2.6, define la forma de estas ruedas.

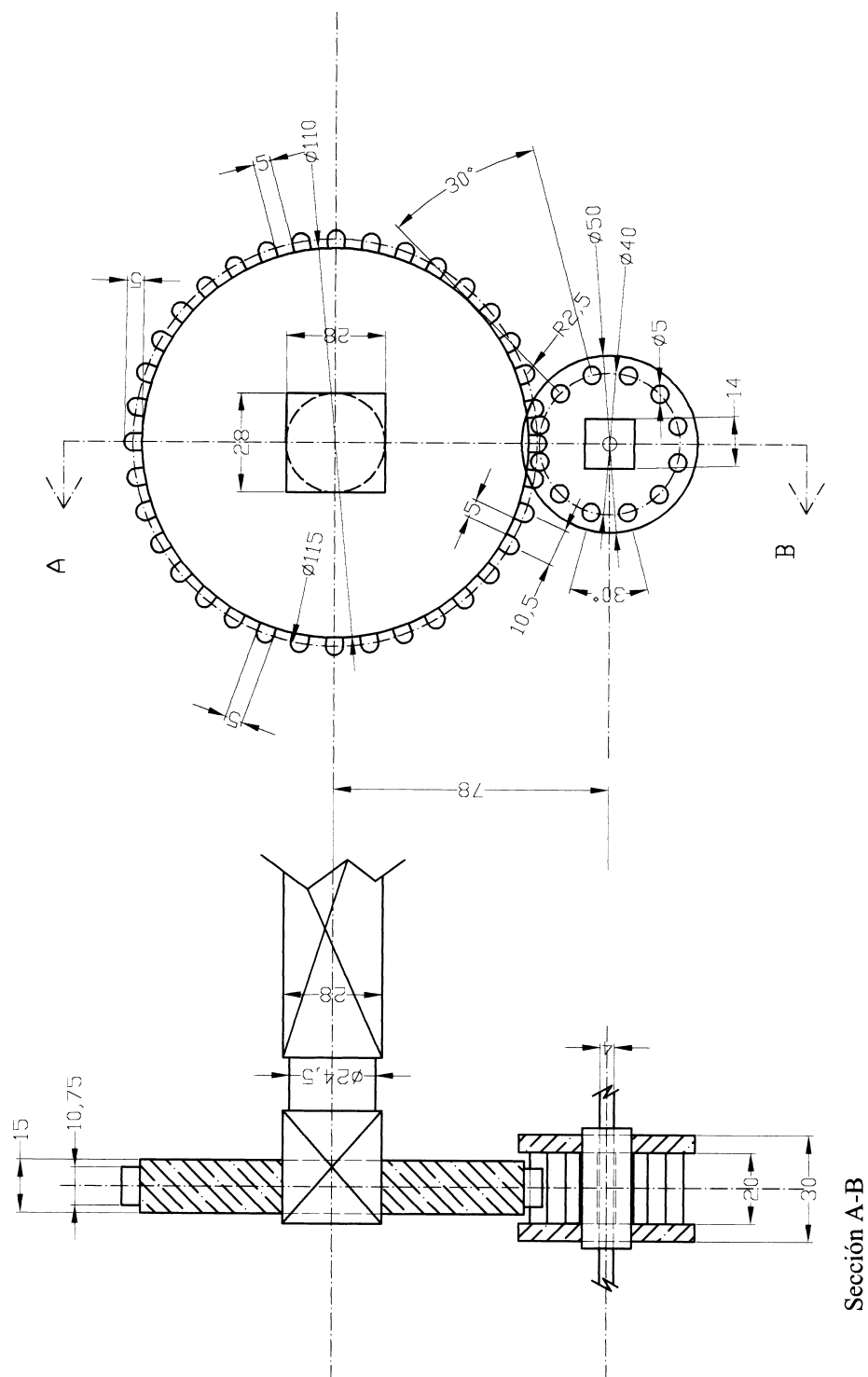


Figura 3.2.6.

Los datos de partida para obtener el número de dientes y el diámetro de la linterna, y los valores obtenidos son:

- Diámetro exterior de la rueda motriz. 120 cm.
- Separación entre dientes en el F ext. 5,2 cm.
- Espesor del diente. 5 cm.

$$\text{Número de dientes} = \frac{\pi \times 120}{10,2} = 36,95 \approx 36$$

$$\text{Distancia real entre dientes} = \frac{\pi \times 120}{36} = 10,47 \text{ cm.}$$

$$\text{Número de dientes en el piñón} = \frac{36}{3} = 12$$

$$\text{Angulo entre ejes de dientes} = \frac{360^\circ}{12} = 30^\circ$$

$$\phi \text{ de eje de dientes en linterna} = \frac{12 \times 10,47}{\pi} = 39,99 \approx 40 \text{ cm}$$

3.2.6.2.- Pie de bomba y pistón.

La figura 3.2.7 está tomada del texto y en ella aparece, junto con la forma de construcción de las tuberías, la forma del pie de bomba y los elementos que contiene el pistón. No se aprecia en ella la manera de montar los componentes ni el funcionamiento. Se ha realizado en primer lugar la válvula de pie, siguiendo lo descrito por el autor, de la cual escribe:

"El extremo inferior de la tubería está encerrado en un tronco de dos pies de profundidad; este tronco, hueco como la tubería, se sitúa en el fondo del sumidero, pero la abertura inferior del mismo está bloqueada con una pieza re-

donda de madera; el tronco tiene perforaciones alrededor, a cuyo través fluye el agua al interior."¹⁰

Considerando que esta parte de la bomba ha de estar sumergida en el sumidero o en los depósitos y que estos últimos tienen de ancho un pie, dimensiones que se dan posteriormente en 3.2.6.4, esta magnitud del depósito define el diámetro exterior máximo que ha de tener el tronco que contiene la válvula. En el diseño se ha supuesto un diámetro de 27 cm que corresponde a 15 dedos, quedando una pequeña tolerancia de un centímetro hasta el ancho interior del depósito.

La madera de la esfera de cierre ha de ser de alta densidad, para evitar que su flotación imposibilite el taponamiento del taladro en la bajada del émbolo. Lo normal es que la esfera estuviera lastrada en un pequeño casquete con objeto de asegurar la obstrucción. La figura 3.2.8 representa la sección de esta parte de la bomba no representada en la obra.

Para los siguientes parámetros

Caudal de cada embolada. 7 dm³

Tiempo empleado por embolada. 2 sg.

Diámetro interior. 8,5 cm.

la velocidad de paso del agua por el agujero de cierre es:

¹⁰ AGRICOLA, G.*Opus citatus*, libro VI, pág. 181.



Figura 3.2.7.

$$\text{Sección de entrada} = \pi \times \frac{d^2}{4} = \pi \times \frac{8,5^2}{4} = 56,745 \text{ cm}^2$$

$$\text{Velocidad de entrada} = \frac{\text{Caudal}}{\text{sección} \times \text{tiempo}} = 6,168 \text{ dm/sg} \approx 0,62 \text{ m/sg}$$

El pistón está descrito por el autor de la siguiente forma:

"Si hay una longitud de tubería, entonces en la parte superior del tronco que se ha ahuecado se encierra una caja de hierro, cobre o latón, de una cuarta de profundidad, pero sin fondo, y una válvula redondeada, tan herméticamente ajustada a ella que el agua, que se ha extraído mediante succión, no puede retroceder; pero si hay dos longitudes de tubería, la caja está encerrada en la tubería inferior, en el punto de unión."¹⁰

Sigue a continuación:

"En la parte superior del vástago de pistón hay una barra de mano, y el fondo está fijo en una zapata; este es el nombre dado al cuero de cubierta, que tiene casi la forma de un cono, pues está tan cosido en el extremo inferior que queda hermético en él, donde se fija al vástago de pistón al que rodea, pero en el extremo superior, donde extrae el agua, está ampliamente abierto. En otro caso, se usa un disco de hierro de un dedo de grueso, o uno de madera de seis dedos de grueso, siendo cualquiera de ellos superior a la zapata. El disco está fijo por medio de una chaveta de hierro, que penetra a través del fondo del vástago del pistón, o bien está roscado sobre el vástago; es redondo, con su parte superior protegida por una cubierta, y tiene cinco o seis aberturas, bien redondas o bien ovaladas, que, juntas, presentan el aspecto de una estrella; el disco tiene el mismo diámetro que el interior de la tubería, de forma que puede subir y bajar dentro de la misma."¹¹

¹¹ AGRICOLA, G. *Opus citatus*, libro VI, pág. 180.

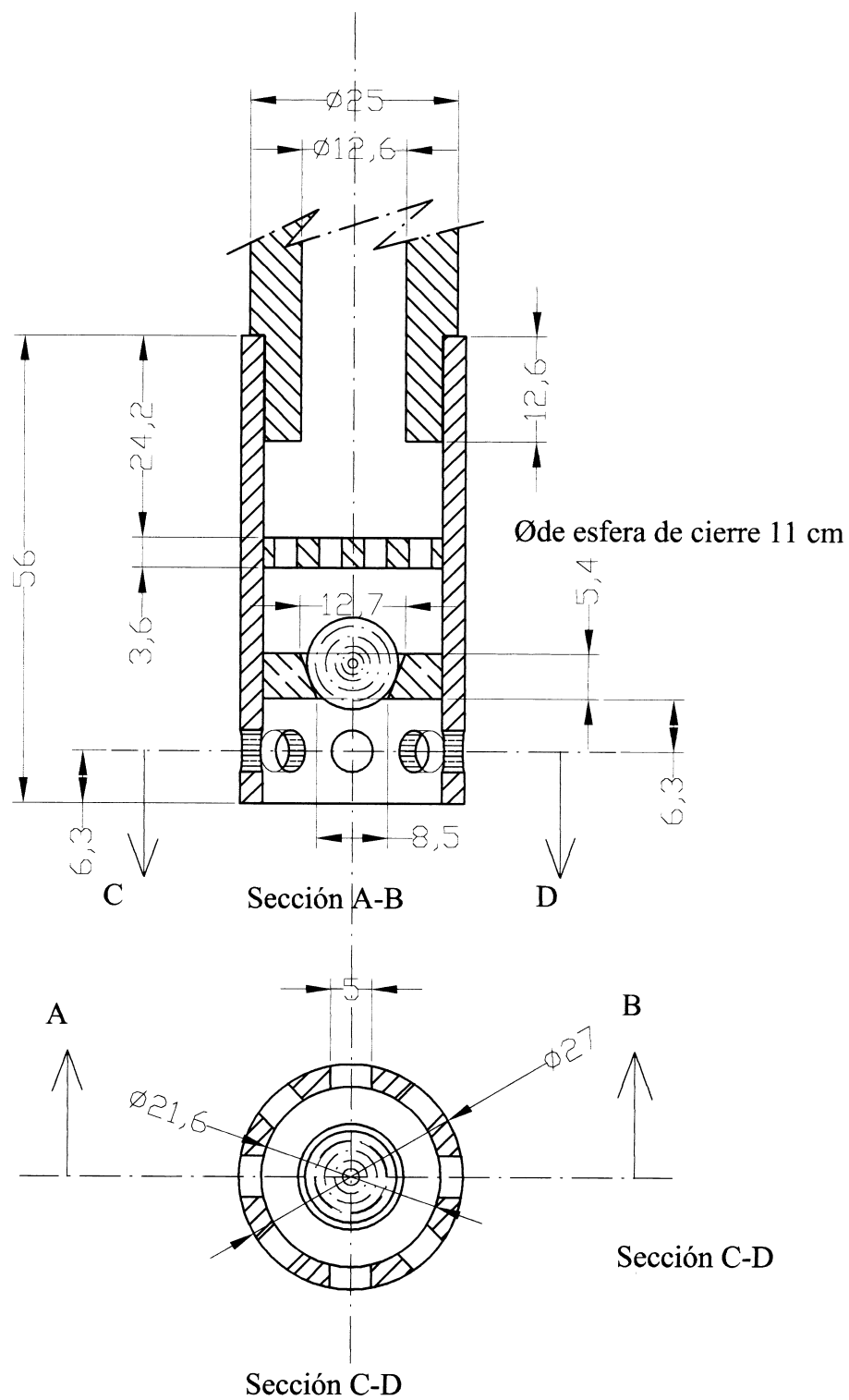


Figura 3.2.8.

Se ha supuesto en los diseños la existencia de dos tramos de tubería, y la caja metálica mencionada en el texto encajada en el extremo superior de la inferior. La caja ha de tener el mismo largo que el recorrido de la manivela -F- aumentado con el espesor del disco y el reborde de la zapata, pues la razón de ser metálica es asegurar la estanqueidad y ha de serlo en todo el recorrido del pistón. La longitud propuesta es 62 cm, en lugar de la cuarta equivalente a 20 centímetros mencionada en el texto.

El primer párrafo define las dimensiones de la caja del pistón, con el error del largo comentado, pero no define con claridad el funcionamiento, quizás debido a los problemas de interpretación del autor y del traductor referidos antes en 3.2.4.

El segundo párrafo describe una bomba manual, pero se incluye porque el pistón es igual en cualquier caso. Se ha de reseñar que hay un error en la frase subrayada del texto traducido, en la que se define que el disco del pistón será de hierro o madera y cualquiera de ellos superior a la zapata, ya que ni en diámetro ni en posición esta pieza puede ser superior a la zapata. Sin embargo, a continuación indica que el disco es redondo con su parte superior protegida con una cubierta que podría ser la zapata, en cuyo caso estaría bien situada. En esto aparece de nuevo la dificultad de la traducción.

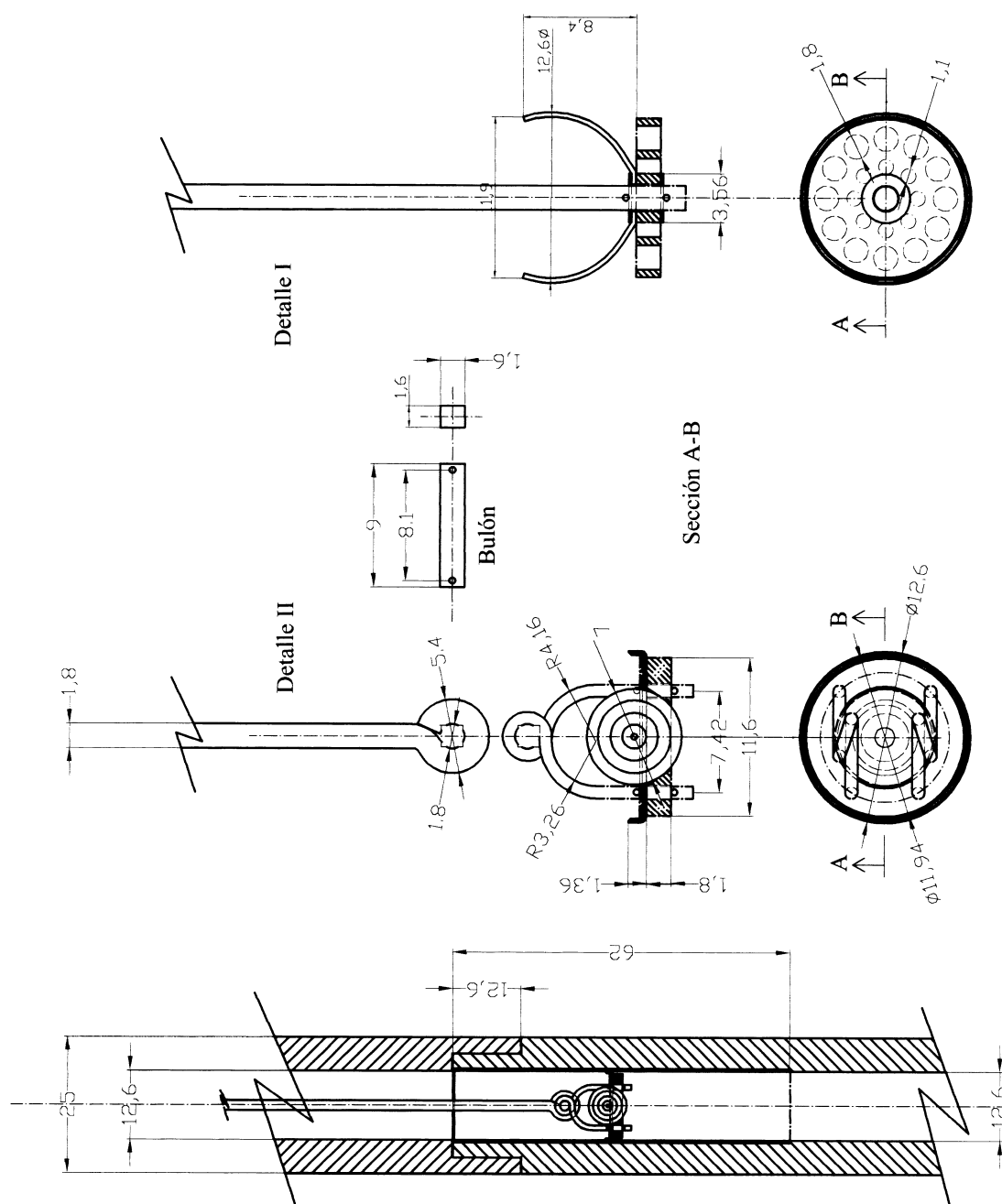


Figura 3.2.9.

Se representan en la figura 3.2.9, la sección de dos modelos de pistón; en el detalle I se muestra un sistema próximo a la descripción contenida en los párrafos transcritos. En el detalle II el que se utiliza en las bombas alternativas, un sistema similar en el pistón al usado en la válvula de pie, adicionándole la zapata para obtener la estanqueidad.

La traducción al francés de la obra, describe con más precisión la válvula reflejada en el detalle I, y dice:

"A una cierta altura, generalmente en la unión de dos tubos si es que hay dos, es emplazada una válvula, en forma de pequeña caja redonda, de hierro, cobre o latón, estando el fondo perforado y recubierto de un cuero que permite al agua entrar pero no salir."¹²

De lo expresado en ambas descripciones y de la figura 3.2.7, se ha diseñado el detalle I de la figura 3.2.9.

Las dimensiones exteriores de ambas pistones son iguales, y la zapata de cuero, necesaria en ambos casos, tiene el mismo diámetro exterior y distinto el interior y la forma. La zapata hace estanco el pistón con la pared de la caja metálica en el momento de la elevación. La correspondiente al detalle I, además de esto, en el descenso se eleva sobre la placa base y deja pasar el agua a través de las perforaciones.

Los elementos que aparecen en la figura 3.2.7 designados -L- y -M-, pueden ser la placa fija perforada superior de la válvula de pie, y la móvil que en el detalle I sirve de asiento a la

¹² ANGEL, M. y otro. *Minas y fundiciones del siglo XV*, pág. 94.

zapata. Aparecen también vástagos de pistón con la placa taladrada incorporada. En ambos modelos se ha adoptado la placa metálica con las dimensiones indicadas en el texto.

En el primer modelo la velocidad de paso del agua a través de los agujeros es superior que en el de cierre por esfera, facilitando con ello la elevación de la zapata. La velocidad en este caso es de 0,93 m/sg.

Se ha calculado a continuación el peso de los diferentes elementos que conforma el sistema completo de las bombas, para conocer el esfuerzo que se ha de aplicar en cada lado de las piezas -U-.

El peso de los pistones será en cada caso:

Detalle I.-

$$\text{Peso de placa} = \pi \left[\left(\frac{11,6}{2} \right)^2 - \left(\frac{6,2}{2} \right)^2 \right] \times 1,8 \times 7,8 = 1.059,91 \text{ gr.}$$

$$\text{Peso de argollas} = 2[2 \times 7,9 + \pi(3,71 + 1,8 + 0,9)] \times 1,8 \times 7,8 = 1.009,13 \text{ gr.}$$

$$\text{Peso de esfera} = \frac{4}{3} \times \pi \times 3,5^3 \times 0,87 = 156,25 \text{ gr.}$$

$$\text{Peso de zapata} = \pi \left[\left(\frac{14,32}{2} \right)^2 - \left(\frac{6,2}{2} \right)^2 \right] \times 0,5 \times 1,5 = 98,15 \text{ gr.}$$

$$\text{Peso total} = 1.059,91 + 1.009,13 + 156,25 + 98,15 = 2.323,44 \text{ gr.}$$

Detalle II.-

$$P. \text{ de placa} = \pi \left[\left(\frac{11,6}{2} \right)^2 - \left(12 \times \left[\frac{1,8}{2} \right]^2 + 8 \times \left[\frac{1,1}{2} \right]^2 + \left[\frac{1,8}{2} \right]^2 \right) \right] \times 1,8 \times 7,8$$

$$\text{Peso de placa} = 912,59 \text{ gr.}$$

$$\text{Peso de zapata} = \pi \left[\left(\frac{14,32}{2} \right)^2 - \left[\frac{1,8}{2} \right]^2 \right] \times 0,5 \times 1,5 = 118,88 \text{ gr.}$$

$$\text{Peso total} = 912,59 + 118,88 = 1.031,47 \text{ gr.}$$

Tal y como se explica en la obra de Agrícola y se ha realizado el diseño, con el pistón situado en el extremo de la primera tubería, el sistema trabaja aspirando en el primer tramo e impulsando en el segundo, con riesgo de descarga de cualquiera de aquellos e inutilización de la serie correspondiente, y siempre con disminución del rendimiento al tener la aspiración algo más de tres metros sin la suficiente estanqueidad. Situando la caja metálica en el mismo espacio que la válvula de pie se evitaría el descebado por falta de ajuste, pues trabajaría el pistón prácticamente en carga evitándose el tramo de aspiración. Parece que al desconocerse la causa que origina el funcionamiento de este tipo de bomba aspirante, se pensaba que habría menos presión en el tubo con el pistón en medio de las tuberías, como ocurre con las máquinas continuas de bolas que se describen en la obra, ignorando que ésto no se cumple en las máquinas alternativas.

3.2.6.3.- Disposición de tuberías y depósitos.

Aunque son dos las bombas en serie que aparecen en la figura 3.2.1, el autor indica que es normal en estas máquinas la instalación de tres, cuando dice al describir este novedoso sistema:

"La séptima clase de máquina, inventada hace diez años, que es la más ingeniosa, duradera y útil de todas, puede hacerse sin mucho gasto. Está formada por varias máquinas que no descienden dentro de la chimenea juntamente, como las últimas descritas, sino que una está debajo de la otra, con lo que sí hay tres, como generalmente es el caso, la inferior eleva el agua del sumidero y la vierte en el primer depósito; la segunda máquina eleva el agua desde este depósito al segundo, y la tercera máquina eleva el agua al desagüe del socavón."¹³

De los desagües y depósitos comenta el autor:

"La parte superior de la tubería superior tiene una muesca o entalladura de un pie de profundidad y una cuarta de ancho, por la que fluye el agua dentro de un depósito o artesa. Cada depósito tiene dos pies de largo y uno de ancho y profundidad."¹⁴

La disposición de los depósitos y las tuberías se representan en la figura 3.2.10. Se han supuesto de diámetro interior 12,6 centímetros y exterior de 25, definidos por el autor y transcritos en el apartado 3.2.6.2. Los depósitos se podían unificar y poner uno solo a cada nivel, según se ha diseñado el mecanismo, pero se ha decidido representarlos como se describe en la obra.

¹³ AGRICOLA, G. *Opus citatus*. libro VI, pág. 189.

¹⁴ AGRICOLA, G. *Opus citatus*, libro VI, pág. 192.

Las salidas del agua a los depósitos intermedios y al cangilón de desagüe se han diseñado de menor tamaño que el que se describe en la obra, pues el caudal de agua en cada envolada es poco para el tamaño de la boca de salida descrito. Siendo un elemento que no afecta al funcionamiento, se ha dimensionado para que sea normal la evacuación.

Se han realizado cortes horizontales en el dibujo de las tuberías para poder representarlas en el tamaño del papel A3, siendo las medidas utilizadas para la realización del diseño las siguientes:

- Ancho del depósito.(a)	28	cm
- Largo del depósito. (b).	56	cm
- Profundidad del depósito.(c)	28	cm
- Ancho de pared del depósito .(d)	5,4	cm
- Diámetro exterior del tubo.(e)	25	cm
- Diámetro ext. del tronco de válv. de pie.(f)	27	cm
- Alto del tronco de válv. de pie.(g).	56	cm
- Largo de tubos sin engaste.(h).	336	cm
- Largo de caja metálica del pistón .(i). . .	56	cm
- Distancia entre ejes de tubos .(j).	32	cm
- Altura de desagües.(k).	20	cm
- Altura de los engastes.(l).	12,6	cm

- Largo de cada cuerpo de bomba.(m). 728 cm
- Distancia entre depósitos.(n). 680 cm
- Altura de elevación total .(o). 20,45 m

Con los parámetros conocidos, se han deducido:

$$(j) = \text{dist. entre ejes de tubos} = \frac{(e)}{2} + (d) + \frac{(a)}{2} = 31,2 \text{ cm}$$

$$(m) = \text{largo de cada bomba} = 2 \times (h) \times 2 - 3 \times (l) + (g) = 728 \text{ cm.}$$

$$(n) = \text{distancia entre depósitos} = (m) - (k) - (c) = 680 \text{ cm.}$$

$$(o) = \text{Altura de elevación} = 3 \times (m) - [2 \times (k) + 3 \times (c) + (k) - (d)]$$
$$(o) = 2.045,4 \text{ cm.}$$

El ancho total ocupado por las bombas en el pozo es:

- Separación entre ejes de bombas 32 cm.
- Ancho exterior de artesa 38,8 cm.
- Diámetro exterior de bomba. 25 cm.

$$\text{Ancho total} = 2 \times 32 + \frac{1}{2} (38,8 + 25) = 95,9 \text{ cm} < 122 \text{ cm.}$$

Esta última cifra de 122 centímetros es la medida de ancho del pozo dado en la obra.

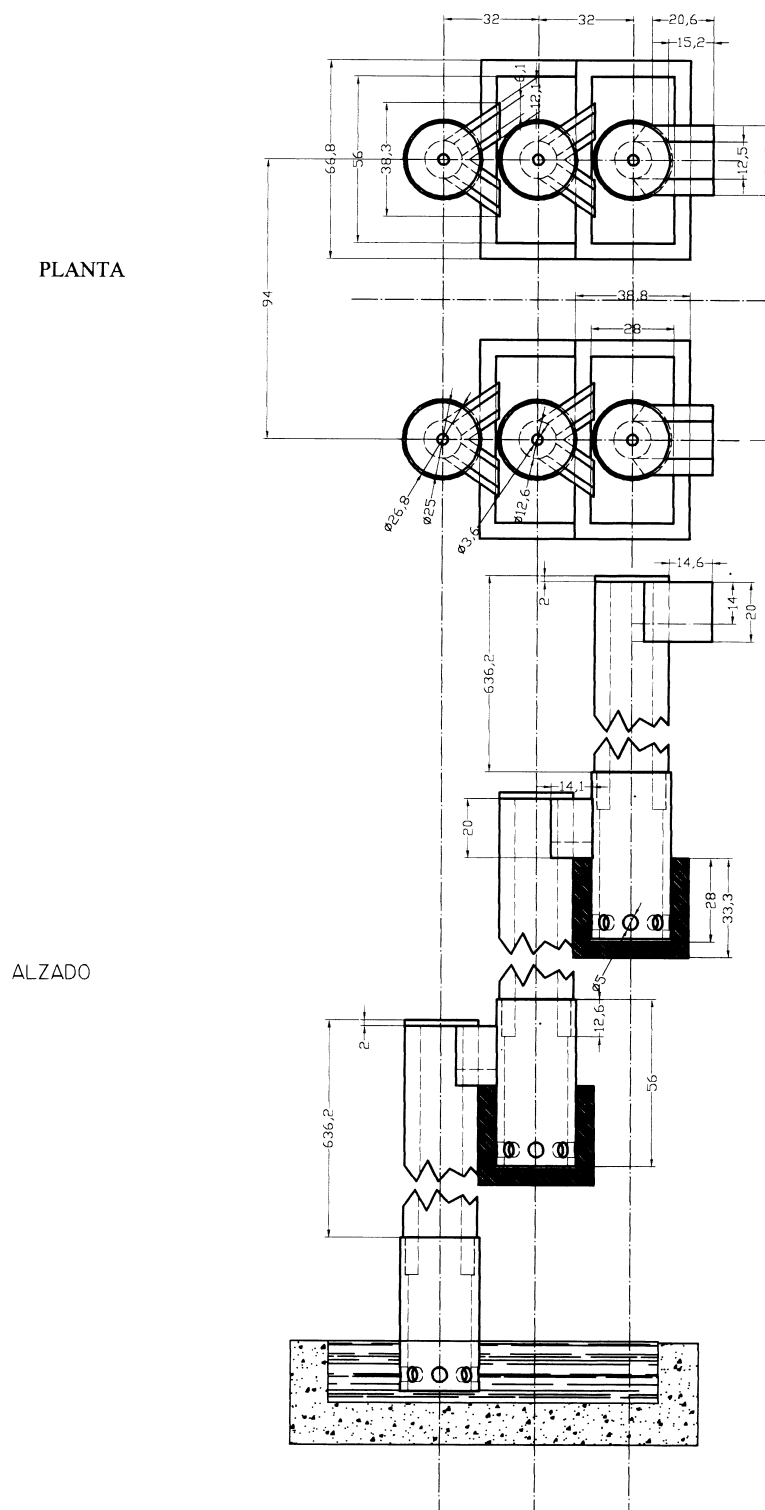


Figura 3.2.10.

3.2.6.4.- Dimensiones y pesos de vástagos de máquinas y piezas -U-

Resulta realmente curioso como la transformación de un movimiento circular en rectilíneo fue usada en el siglo XV cuando se emplearon las bombas para la elevación de agua, y no fue aplicado este mismo procedimiento para la transformación del movimiento rectilíneo en circular a mediados del siglo XVIII cuando se inventó la primera máquina de vapor atmosférica.

Las medidas para los diferentes elementos que transforman el movimiento circular de la rueda hidráulica en rectilíneo son:

- Longitud de la manivela del eje de piñón -F- 28 cm.
- Longitud del vástago de máquina -I-. 80 cm.
- Grosor del soporte guía -Q- 10,8 cm.

El primer dato está tomado de la parte del texto transcrita en el apartado 3.2.2. a). El segundo se ha tomado por semejanza con el dibujo y para no generar un excesivo ángulo de desvío. El tercero es derivado de las dimensiones que el autor da al gancho de madera o estribo -Q-, que este nuevo elemento sustituye, cuando dice:

"Desde este pequeño eje, los ganchos de madera se extienden dos pies, con una anchura y grosor de seis dedos;"¹⁵

¹⁵ AGRICOLA, G.*Opus citatus*, pág. 191.

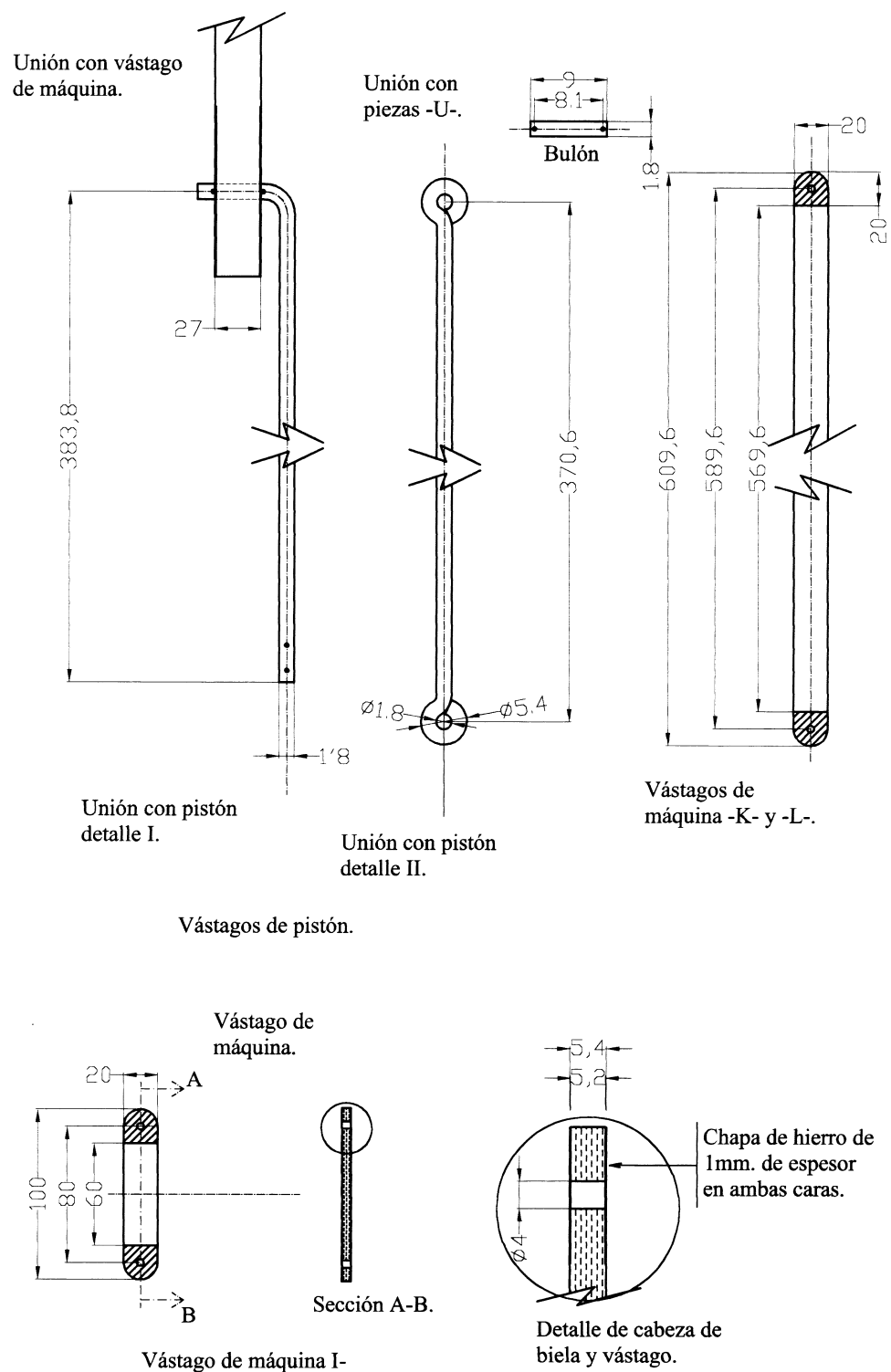


Figura 3.2.11.

La variación de móvil a fijo de la pieza -Q- en el diseño 1 hace que la longitud no sea necesariamente la descrita, aunque si se ha mantenido el grosor de seis dedos. En el diseño 2 si se han mantenido los valores fundamentales para la elaboración del gancho de madera.

La referencia a los vástagos las hace el autor del siguiente modo:

"El primer vástago de pistón es de unos doce pies de largo; los otros dos tienen ventiseis pies, y cada uno tiene una cuarta de ancho y tres dedos de grueso.

Los lados de cada vástago de bomba están cubiertos y protegidos por placas de hierro que se sostienen mediante tornillos de hierro, en forma tal que cuando una parte se ha dañado se puede reparar."¹⁶

En ambos párrafos se refiere a los vástagos de máquinas, aunque los denomina de pistón y de bomba; se observa que para ambos elementos da la misma descripción y coincide con la forma que tiene los de máquina -K- y -L- de la figura 3.2.2. Además, siendo los vástagos de pistón los que por el interior de la tubería de impulsión han de dar movimiento a los émbolos, no pueden tener una cuarta de ancho, -equivalente a 20 centímetros-, si el diámetro interior del tubo tiene 7 dedos, -aproximadamente 12,6 centímetros-, como refiere el autor cuando dice:

¹⁶ AGRICOLA, G. *Opus citatus*, Pág. 191.

"Cada bomba está formada por dos longitudes de tuberías, cada una de las cuales tienen doce pies de largo, siendo de siete dedos el diámetro interior."¹⁷

En la explicación que da el autor del funcionamiento de la máquina, nombra y describe a cada uno de los vástagos coincidiendo con la leyenda que acompaña a la figura 3.2.2. Esta explicación del funcionamiento de la máquina es semejante a la expuesta en el apartado 3.2.2.

Los vástagos de máquina representados en la figura 3.2.11 son los elementos intermedios que transmiten el movimiento a los vástagos de pistón de las bombas y a las piezas -U- o a las -I- de reparto de fuerza.

En este estudio se denominan vástagos de máquina los -I-, -K- y -L- de las figura 3.2.1 y 3.2.2. Los de pistón o de bomba, que van unidos al émbolo, son los -M-, -N- y -O- de ambas figuras. Los primeros se consideran con las dimensiones expresadas en la obra y los segundos se suponen barras cilíndricas de un dedo de diámetro, equivalente a 1,8 centímetros.

Según la descripción anterior de Agrícola, los vástagos de máquinas están formados por barras rectangulares de 20 cm de ancho y 5,4 cm de espesor, reforzadas en los extremos por placas de hierro sujetas por tornillos y taladradas en estos extremos para realizar las uniones mediante bulones y chavetas.

¹⁷ IBIDEM, pág. 192.

La longitud que han de tener los de máquina se obtienen a partir de los siguientes parámetros:

- Profundidad del depósito.(c) 28 cm
 - Altura de desagües.(k). 20 cm
 - Largo de cada cuerpo de bomba.(m). 728 cm
 - Altura entre taladros de pieza -U-.(p) 90,4 cm
 - Altura entre taladros de vástago de máq.(q). 589,6 cm
- $$(q) = (m) - [(c) + (k) + (p)] = 589,6 \text{ cm.}$$

El peso de estos vástagos se obtiene a partir de los siguientes valores:

- Densidad de la madera. 0'8 g/cm³.
- Densidad del hierro. 7'8 g/cm³.
- Ancho del vástago. 20 cm.
- Grueso del vástago 5,4 cm.
- Largo del vástago -I- entre taladros. 80 cm.
- Largo de los vástagos -K- y -L-entre taladros. 590 cm.
- Espesor del refuerzo de hierro. 0'1 cm.

$$\text{Peso del refuerzo} = \left(\frac{\pi r^2}{2} + 2r^2 \right) \times 0,1 \times 7,8 = 278,5 \text{ g.}$$

$$\text{Peso de - I-} = \left(80 \times 20 + 2 \frac{\pi r^2}{2} \right) \times 5,4 \times 0,8 = 8.268,48 \text{ g.}$$

$$\text{Peso de - K - y - L-} = \left(590 \times 20 + 2 \frac{\pi r^2}{2} \right) \times 5,4 \times 0,8 = 52.332,48 \text{ g.}$$

$$\text{Peso total de - I-} = 8.268,48 + 4 \times 278,5 = 9.382,48 \text{ g.}$$

$$\text{Peso total de - K - y - L-} = 52.332,48 + 4 \times 278,5 = 53.446,48 \text{ g.}$$

Los vástagos de pistón disponen en los extremos de un ojal para realizar en él la unión con las piezas -U- y con los pistones de detalle II de la figura 3.2.9. La parte interior del ojal se prevé con un ligero rectificado para que el asiento sobre los bulones se efectúe en un plano. Para la unión con los vástagos de máquina se ha previsto una terminación con un doblez en forma de L invertida que se introduzca en el taladro del extremo de aquellos. La unión con las válvulas de detalle I se hace atravesándola por el taladro central practicado en ella y fijándola con dos pasadores y arandelas, como se observa en la figura 3.2.9.

Según los siguientes parámetros la longitud de los vástagos de pistón ha de ser:

- Largo de tubo superior de bomba. 336 cm.
- Recorrido de pistón. 56 cm.
- Altura del engaste. 12,6 cm.
- Altura del soporte de pistón I. 8,8 cm.
- Altura de sujeción de pistón II 4,4 cm.

$$\text{Long. vástago pistón I} = 336 + 56 - (12,6 + 8,8) = 370,6 \text{ cm.}$$

$$\text{Long. vástago pistón II} = 336 + 56 + 4,4 - 12,6 = 383,8 \text{ cm.}$$

El peso de estos vástagos es:

$$\text{Circunferencia media de ojal de sujeción} = 3,6 \times \pi \quad \text{cm.}$$

$$\text{Desarrollo del bastón en L invertida} = 9 \quad \text{cm.}$$

$$\text{Vástago I} = 0,9^2 \times \pi (371 + 2 \times 3,6 \times \pi) \times 7,8 = 7.812,4 \text{ g.}$$

$$\text{Vástago II} = 0,9^2 \times \pi (384 + 9) \times 7,8 = 7.796,5 \text{ g.}$$

La figura 3.2.11, representa la forma y dimensiones de estos dos tipos de vástagos.

La longitud que han de tener los brazos de la pieza -U- para poder deslizarse en el interior del soporte que guía su movimiento, soporte que se propone en el diseño 1 como solución en el apartado 3.2.3 c) para sustituir al estribo -Q-, ha de ser la del recorrido vertical de la manivela -F-, incrementada con el grueso del propio soporte, con las cabezas de los vástagos y piezas -U- y alguna tolerancia. El valor es:

$$U_m = 2 \times 28 + 10,8 + 10 + 10 + 3,6 = 90,4 \text{ centímetros.}$$

Los dos sumandos iguales corresponden a la distancia desde los centros de los taladros de vástagos de máquina al borde de ellos. Se ha incrementado esta longitud con un valor de tolerancia de dos dedos, equivalente a 3,6 centímetros.

La pieza -U- se ha dibujado en el esquema de la figura 3.2.12 en el mismo plano en el que se mueve la manivela -F-,

siguiendo la solución adoptada en 3.2.3 b). El soporte fijo que sustituye al gancho de madera -Q- se ha dibujado en alzado, con las medidas de grueso dadas por el autor y el largo necesario.

La solución analítica da un resultado semejante para el valor del ángulo de desvío del vástago de máquina -I- que la gráfica de la figura 3.2.12:

$$\text{Sen} \frac{\alpha}{2} = \frac{F}{H} = \frac{28}{80} \Leftrightarrow \alpha = 2 \times \text{arc sen} \frac{28}{80} = 40,97^\circ$$

A las piezas -U -, de las cuales no se hace mención en la obra, se les ha supuesto dobles para centrar el esfuerzo en los bulones, según se comenta en el apartado 3.2.5, y de espesor la mitad de la que tienen los vástagos de máquinas. Esta solución aparece en la unión con los vástagos de máquina -K- y -L- de la figura 3.2.2.

La velocidad de la máquina puede que admitiera el esfuerzo descentrado pero, como antes se comenta, se hace por similitud con la transmisión representada en la figura 3.2.2, toda ella realizada con bulones.

La unión entre los últimos vástagos de máquina y los correspondientes vástagos de pistón se realiza, como se representan en la figura 3.2.11, aminorándose el efecto que produce el descentrado de los ejes con el paso del vástago de pistón a través del taladro practicado en la tapa de cierre del tubo de la bomba, que le sirve de guía.

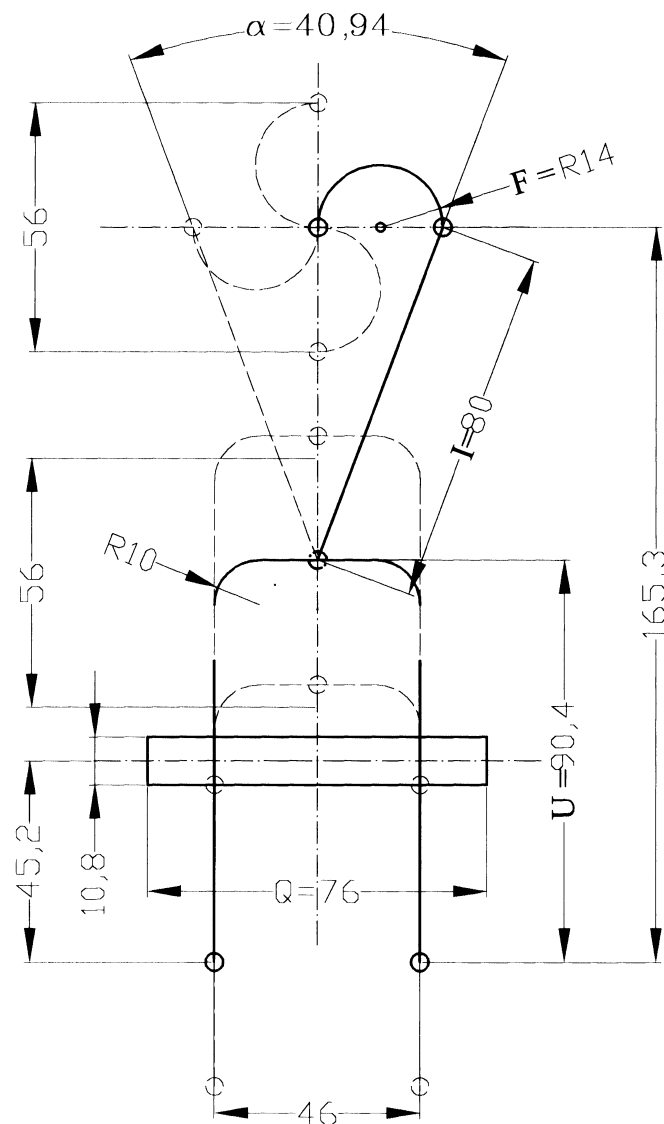


Figura 3.2.12.

Otra posible sujeción para accionar la última bomba es haciendo que el vástago de pistón cuelgue directamente de la pieza -U- mediante un ojal y el correspondiente bulón, de igual manera que se realiza la unión con la bomba primera. Se evita con esta solución el desvío que ha de darse a la última bomba en el primer caso, por causa de que el cuelgue desvía al vástago de

pistón una longitud igual a la semisuma de su diámetro y del grueso del vástago de máquina, pero sería excesivamente largo para el diámetro adoptado.

La figura 3.2.1, indica que el primer vástago de máquina -I- convierte el movimiento circular del piñón -E- en rectilíneo y lo transmite a la primera pieza -U- que reparte el movimiento a las bombas. Esta pieza soporta sobre un brazo los accesorios y el agua de una bomba y sobre el otro los de dos bombas, generándose un desequilibrio en los esfuerzos. La segunda, sopor-tando los accesorios de una bomba en cada brazo, está descom-pensada solo por el peso del vástago de máquina (figura 3.2.13).

No analiza el autor este inconveniente, ni se elimina con la utilización de los estribos -Q- del modelo. En la figura 3.2.1 en la que el autor sitúa dos bombas en cada rama, el esfuerzo está más compensado y no se produce tan fuerte desequilibrio, pero en el caso de la figura 3.2.2, la diferencia de pesos en la prime-ra pieza -U- sí produce una excesiva descompensación.

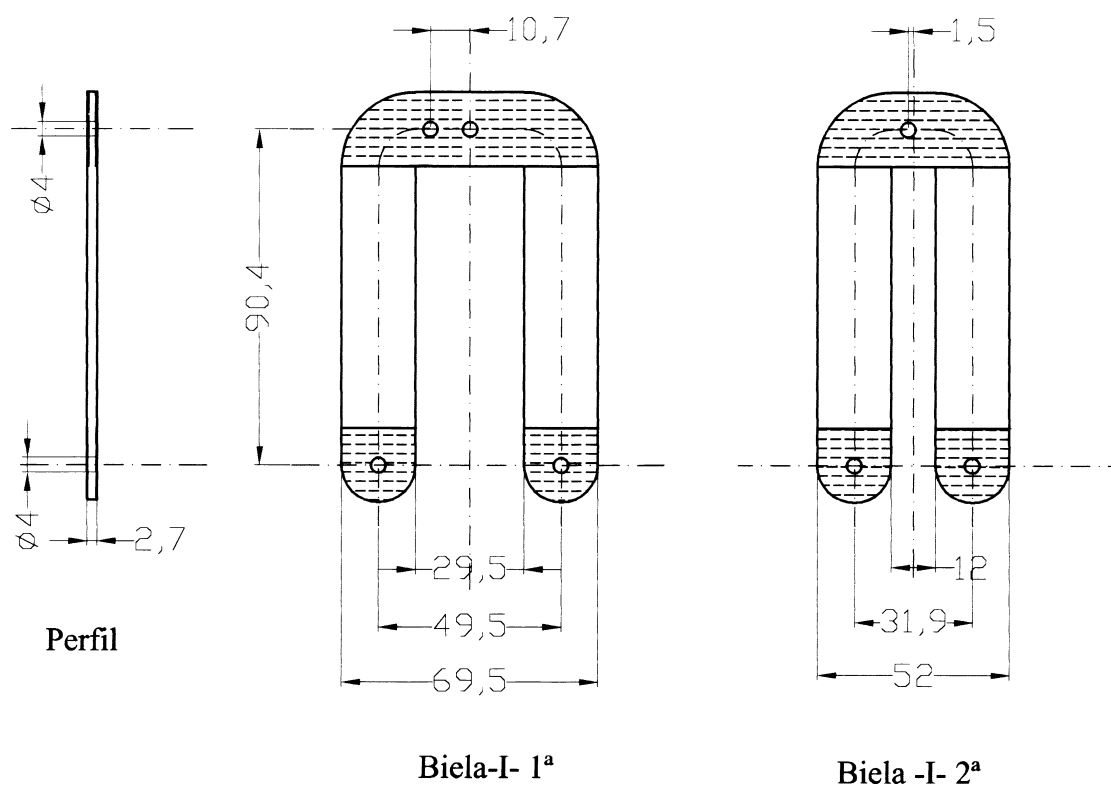


Figura 3.2.13

El enganche de las piezas -U- e -I- se sitúa de distinta forma en ambos dibujos, pues en el primero se unen las dos piezas, y en el segundo, el movimiento se transmite por medio del estribo -Q-, con la unión descentrada respecto al eje de -U-, pero en sentido contrario al que habría de tener para corregir el desequilibrio. Esta disposición, que se repite en la pieza -U- inferior, podía interpretarse como la corrección, mal aplicada, del desequilibrio en los casos de tres o más bombas; pero no parece que sea ésta la razón del montaje, pues éste se realiza con el

descentrado a la misma distancia en ambos casos, siendo los esfuerzos diferentes.

La sustitución en el diseño 1 de los ganchos de madera por soportes fijos si elimina el problema, pues impide el giro de la biela por efecto de la diferencia de pesos. No obstante, se representan dos taladros en el lado horizontal de la pieza -U-, uno de ellos centrado y el otro desplazado de su eje, éste será el utilizado en el modelo para la sujeción del vástago de máquina con objeto de compensar los momentos, ya que existiendo una diferencia de pesos apreciable en los brazos, se producirían rozamientos excesivos en el soporte, si la unión se hiciera centrada.

La separación entre los lados paralelos de la pieza -U- ha de ser la necesaria para actuar sobre los vástagos que accionan las bombas, librando los depósitos intermedios. Este valor ha de obtenerse de la figura 3.2.10.

Como antes se dijo, esta pieza se ha previsto que sea doble, instaladas una junto a la otra y separadas por el espesor de los vástagos que soporta. Su grosor será la mitad de la que tiene el vástago de máquina.

La pieza U situada a más profundidad ha de tener una distancia entre ejes de lados paralelos de 32 centímetros, que es la distancia existente entre los ejes de las dos bombas que acciona.

Para obtener la posición del taladro de sujeción de esta pieza a fin de que se anule el momento resultante por la diferencia de pesos a elevar, han de igualarse los momentos que se

producen en cada lado, tomando el taladro como centro de momentos. Los pesos de vástagos y pistones de cada rama, junto con el volumen de agua contenido en la tubería, será la fuerza aplicada a cada uno de ellos.

Se obtiene esta posición del taladro analíticamente a partir de los siguientes valores:

- Distancia del taladro al primer eje a cm
- Distancia del taladro al segundo eje. b cm
- Peso de la columna de agua en las bombas
S/ apartado 3.2.7. 237 kg.
- Distancia entre taladros de lados paralelos. . . 32 cm.

$$(P_1 + 237)a = (P_2 + 237)b \Leftrightarrow 300,6 \times a = 247,1 \times b$$

$$a + b = 32 \text{ cm.}$$

$$P_1 = V_{\text{ást.máq.}} + V_{\text{ást.pistón}} + \text{pistón} = 53,5 + 7,8 + 2,3 = 63,6 \text{ kg}$$

$$P_2 = V_{\text{ást.pistón}} + \text{pistón} = 7,8 + 2,3 = 10,1 \text{ kg.}$$

$$300,6 \times a = 247,1(32 - a) \Leftrightarrow 300,6 \times a = 7.907,2 - 247,1 \times a$$

$$a = \frac{7.907,2}{547,7} = 14,437 \approx 14,5 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad b = 32 - 14,5 = 17,5 \text{ cm}$$

El peso de esta pieza será:

$$\text{Sup. de madera} = (2 \times 67 + 12) \times 20 + \pi \times 10^2 + \frac{1}{2} \pi \times 20^2 = 3.862,32 \text{ cm}^2$$

$$\text{Sup. de hierro} = (12 + 2 \times 5) \times 20 + \pi \times 10^2 + \frac{1}{2} \pi \times 20^2 = 1.382,32 \text{ cm}^2$$

$$\text{Peso pieza} = 3.862,32 \times 2,7 \times 0,8 + 1.382,32 \times 0,1 \times 7,8 = 9.420,82 \text{ g.}$$

La situación del taladro en la primera pieza -U- se realiza de igual manera, considerando que en el lado “a” deberá llevar el peso de dos columnas de agua.

- Distancia entre taladros de lados paralelos. . . 49,5 cm.
resultado de sumar 32 centímetros de separación entre ejes de bombas a la distancia “b” de la pieza -U- anterior.

$$(P_1 + 2 \times 237) \times a = (P_2 + 237) \times b \quad \Rightarrow \quad a + b = 49,5 \text{ cm.}$$

$$P_1 = 2 \times \text{vást.máq} + 2 \times \text{vát.pistón} + 2 \times \text{piezaU} + 2 \times \text{pistón}$$

$$P_1 = 2 \times 53,5 + 2 \times 7,8 + 2 \times 9,5 + 2 \times 2,3 = 146,2 \text{ kg.}$$

$$P_2 = \text{vást.pistón} + \text{pistón} = 7,8 + 2,3 = 10,1 \text{ kg.}$$

$$(146,2 + 474) \times a = (10,1 + 237) \times b = 247,1 \times (49,5 - a)$$

$$867,3 \times a = 12.231,45 \quad \Leftrightarrow \quad a = 14,1 \text{ cm.} \quad \Rightarrow \quad b = 35,4 \text{ cm.}$$

El peso de esta pieza es:

$$\text{Sup. madera} = (2 \times 67 + 29,5) \times 20 + \pi \times 10^2 + \frac{1}{2} \pi \times 20^2 = 4.212,32 \text{ cm}^2$$

$$\text{Sup. hierro} = (29,5 + 2 \times 10) \times 20 + \pi \times 10^2 + \frac{1}{2} \pi \times 20^2 = 1.932,32 \text{ cm}^2$$

$$\text{Peso pieza} = 4.212,32 \times 2,7 \times 0,8 + 1.932,32 \times 0,1 \times 7,8 = 10.605,82 \text{ g.}$$

Aunque el ancho de los vástagos y piezas -U-, nos parece excesivo, se han considerado las medidas del texto sin introdu-

cir ninguna modificación. La figura 3.2.13 representa el tamaño y disposición de los taladros en las piezas -U-.

En el diseño 2 se eliminan las piezas -U- sustituyéndolas por dos vástagos -I- no afectándole la diferencia de peso de las columnas. La primera de ellas mueve el primer pistón y la segunda los dos inferiores, mediante un sistema similar al que se hace a partir de la manivela -F- que comienza en el extremo de los vástagos -K-. Los vástagos -I- tienen el mismo espesor y refuerzo en los extremos que los demás. El vástago de mayor longitud que se dibuja en la figura 3.2.14 es el que acciona la primera bomba, los inferiores tienen longitud igual al menor de los dibujados. Se ha proyectado así para producir el tiro en el que soporta las dos bombas más centrado con el giro de la manivela.

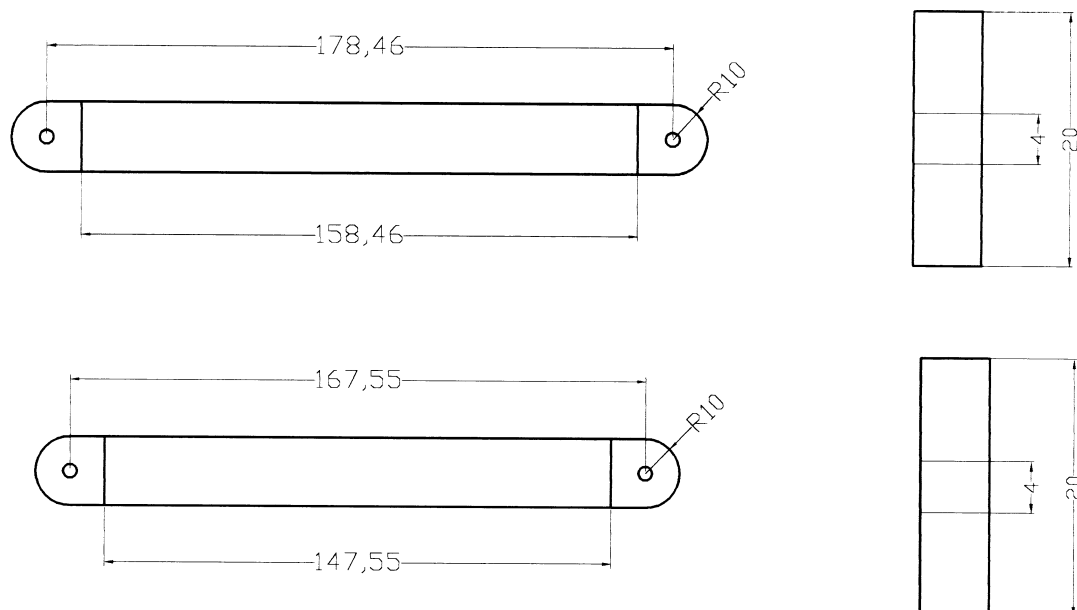


Figura 3.2.14.

Los ganchos de madera -Q- son similares, variando solamente el soporte para ajustar el superior a la bancada y el inferior al entramado del pozo. Se representan en la figura 3.2.15.

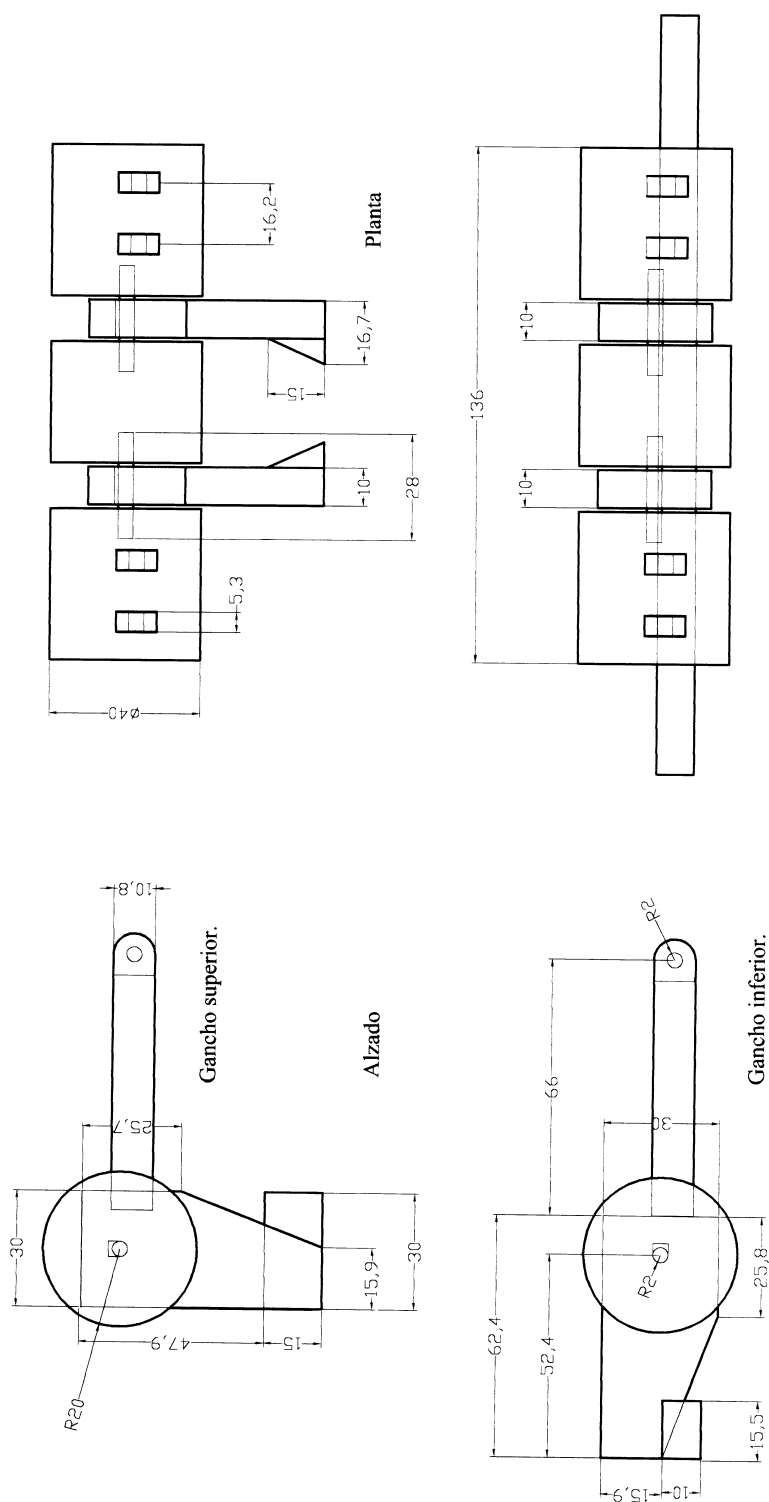


Figura 3.2.15.

3.2.6.5- Uniones de manivelas, bielas y vástagos.-

La descripción que de estas uniones hace el autor dice:

"Con objeto de evitar que el vástago de pistón pueda deslizarse fuera de él, como fácilmente podría ocurrir, y para que se pueda sacar cuando sea necesario, su abertura es más ancha que la parte correspondiente del brazo de manivela, y está sujeta sobre ambos lados por medio de chavetas de hierro. Para evitar la fricción, los extremos de los vástagos de pistones están protegidos por placas de hierro o cueros intermedios."¹⁸

Denomina el autor chavetas a los pasadores que impiden el desplazamiento de los vástagos -I- en los ejes. Los cueros intermedios habían de ser arandelas, susceptibles de ser engrasadas, para suavizar el roce de los extremos metálicos de los vástagos con las chavetas.

Se representa en la figura 3.2.16 y 3.2.17 el conjunto de las superestructuras de ambos diseños, y las uniones de la biela -I- con la manivela -F- y con los vástagos de máquina y de pistón. La prolongación de la manivela -F-, no se ha supuesto de un pie como indica la transcripción del texto reseñada en 3.2.3.a), sino lo necesario para realizar la unión, evitando así una excesiva separación entre las bombas.

La parte superior de la primera bomba, marca la posición de ésta con respecto al nivel del suelo. La sección del terreno en el alzado, corresponde a la mayor dimensión del pozo.

¹⁸ AGRICOLA, G.*Opus citatus*. Libro VI, pág 191.

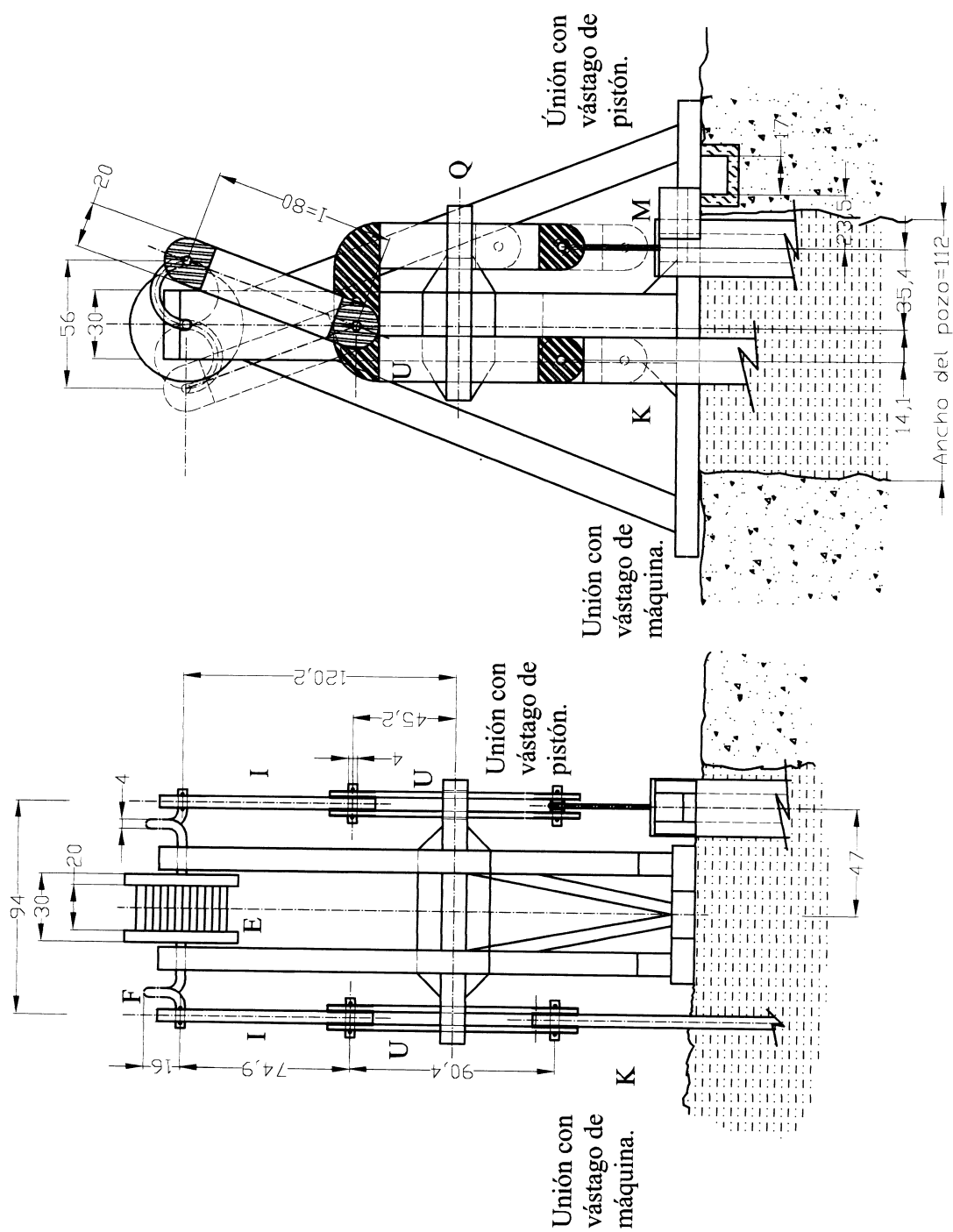


Figura 3.2.16.

La unión de la doble pieza -U- del diseño 1 con los vástagos de máquina -I- y -K- se diseña de igual forma mediante un bulón que une los tres elementos, impidiéndose el desplazamiento mediante chavetas, similares a las alojadas en la manivela -F- respecto al vástago -I-. La gran superficie de hierro que tienen las cabezas suaviza la fricción, y sería tan solo necesario lubricar las caras. El autor se refiere a esto en la obra cuando dice:

"Para evitar la fricción, los extremos de los vástagos de pistones están protegidos por placas de hierro o cueros intermedios...

Los lados de cada vástago de bomba están cubiertos y protegidos por placas de hierro que se sostienen mediante tornillos de hierro, en forma tal que cuando una parte se ha dañado se puede reparar."¹⁹

Los vástagos de pistón se sujetan de igual forma, supliendo el espacio sobrante entre las dos piezas -U- con arandelas de cuero de 1,8 centímetros de espesor. La lubricación se realizaría manteniendo engrasadas estas arandelas.

De la misma forma se colgarán los vástagos de las bombas -B- y -D- de las piezas -U- gemelas inferiores.

En el diseño 2 las uniones se hacen con el mismo criterio, suavizando los contactos con arandelas.

¹⁹ AGRICOLA, G.*Opus citatus*. Libro VI, pág. 191.

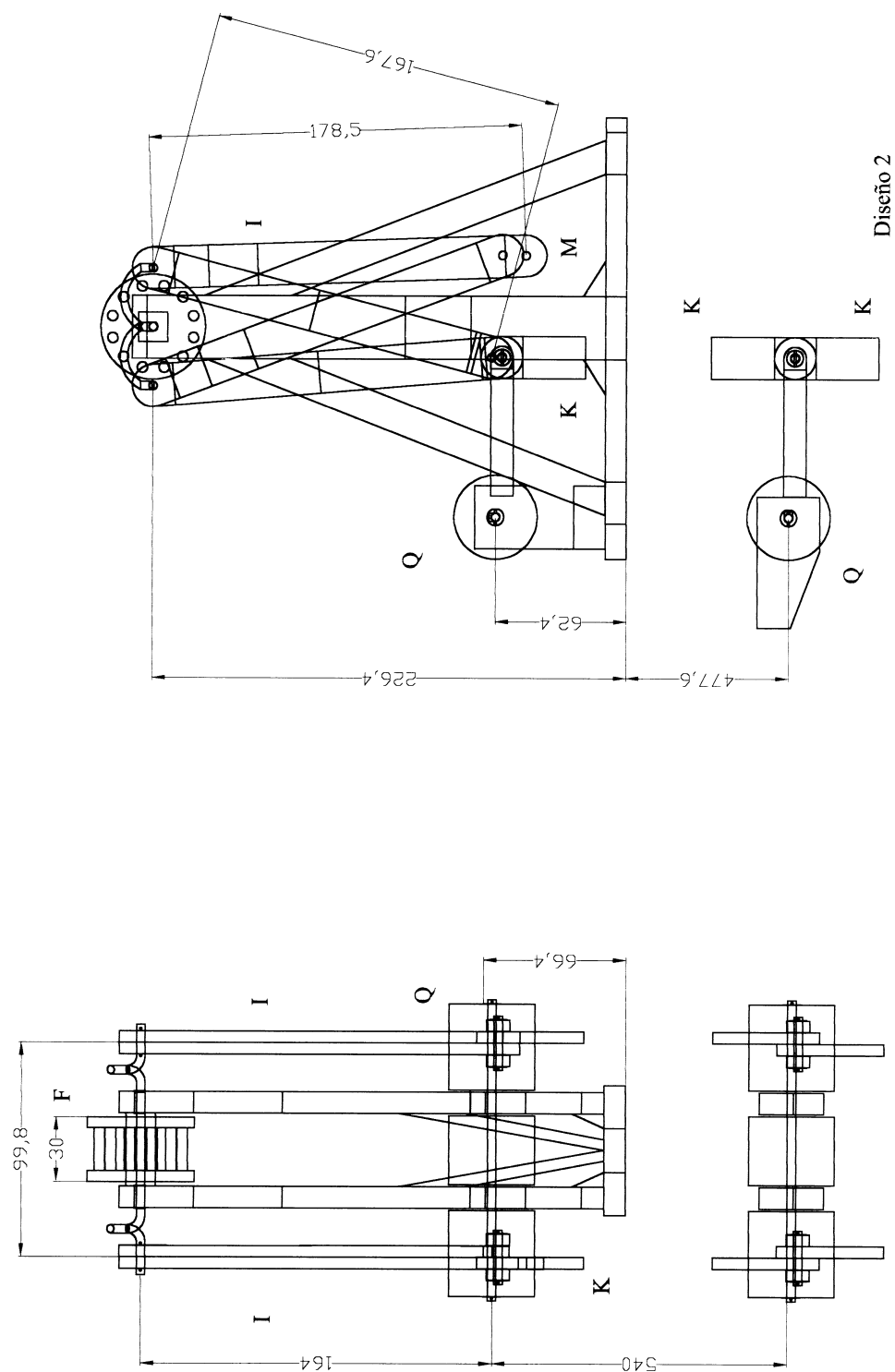


Figura 3.2.17.

3.2.6.6.- Bancada.

Tomada de la figura anterior, se asemeja a las descritas y representadas en el libro VI. Puesta sobre la boca del pozo se elimina la columna central que aparece en la figura 3.2.1. La razón de eliminarla se expone en el apartado 3.2.3.j).

En la figura 3.2.18 y 3.2.19 se definen la forma y dimensiones de las estructuras. Este tipo de bancada se instalaba en uno de los extremos del pozo, permitiendo que se realizara el movimiento y acarreo de los materiales y el acceso de los mineros en el resto de la abertura. En el caso de extracciones importantes o cuando otra posición distinta del pozo disminuía la altura de elevación, se habilitaba uno para uso exclusivo del drenaje.

3.2.6.7.- Ejes y soportes.

El autor se refiere en la obra a los ejes utilizados generalmente en la minería (aunque el párrafo forma parte de la descripción que hace del malacate de caballo) de esta forma:

"Cada eje utilizado en minería, para hablar de ellos de una vez para siempre, tienen dos soportes de hierro, redondeados en todos los lados, uno fijo con chaveta en el centro de cada extremo. La parte de este soporte que está fija al extremo del eje es tan ancha como el propio extremo y tiene un dedo de grueso; la que se proyecta más allá del eje es redonda, teniendo una cuarta de grueso, o más si así fuera necesario; los extremos de cada eje de minero están circun-

dados y unidos por una banda de hierro para sostener el soporte con más seguridad."²⁰

²⁰ AGRICOLA, G. *Opus citatus*. Libro VI, pág. 167.

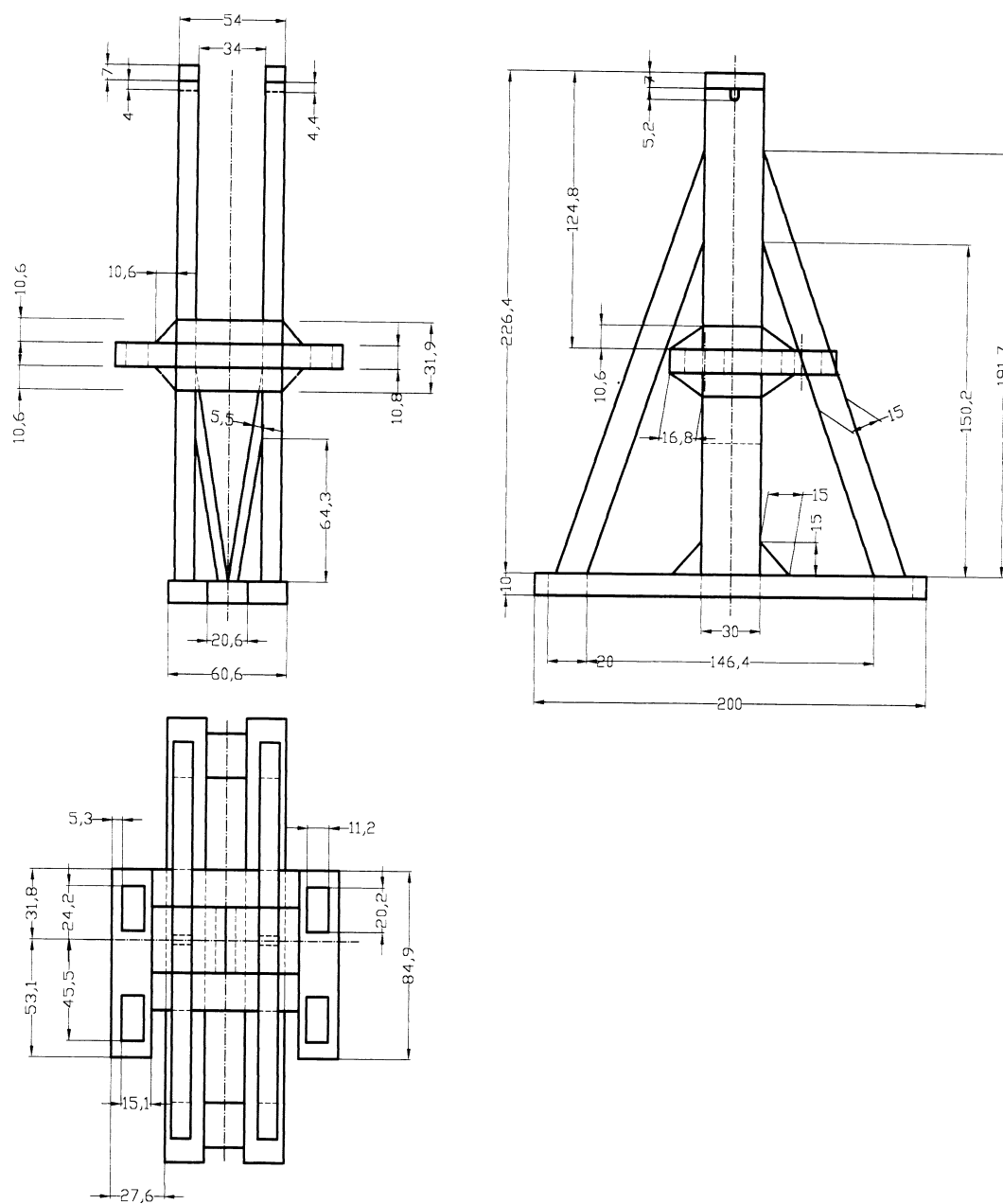


Figura 3.2.18.- Diseño 1.

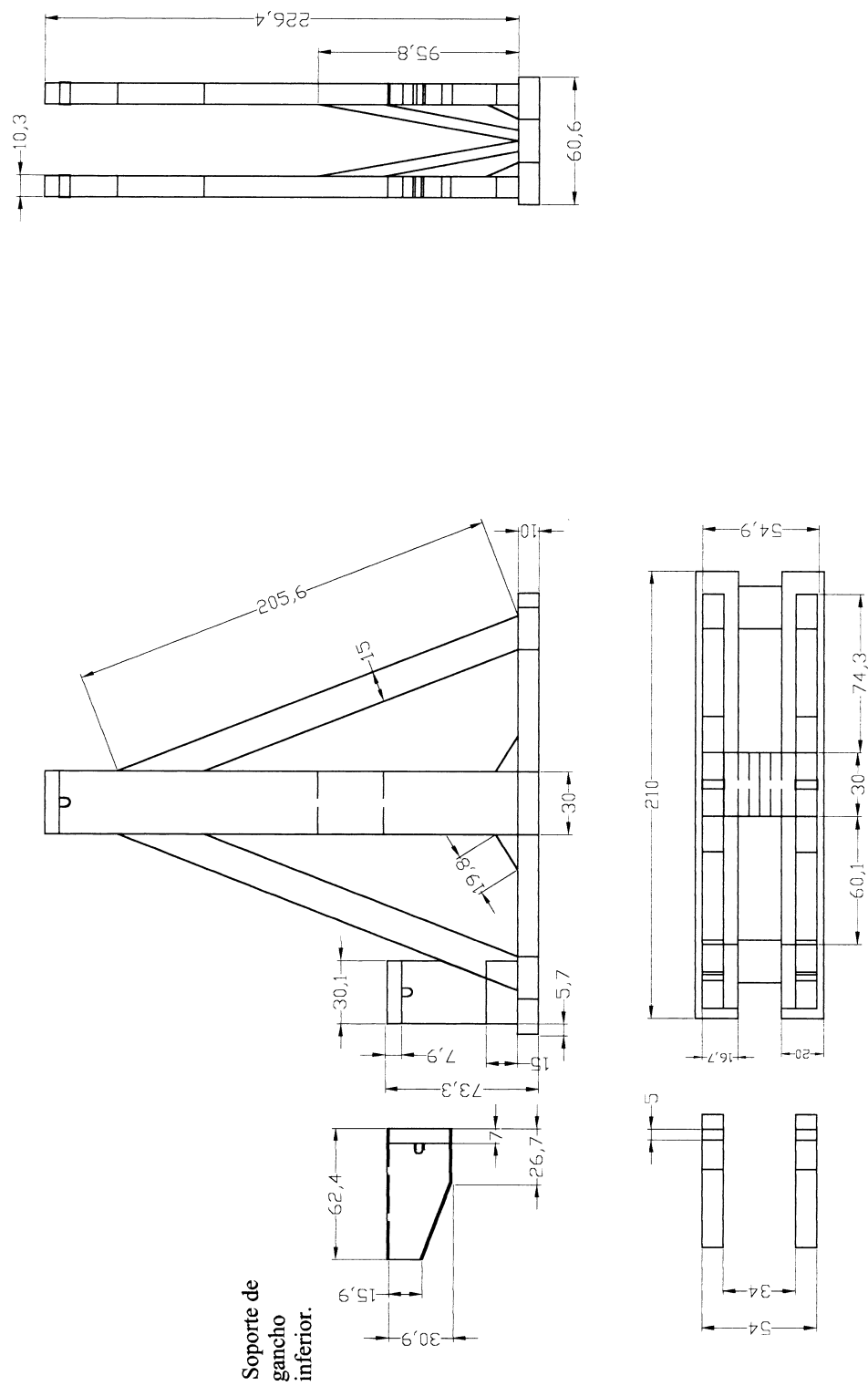


Figura 3.2.19.- Diseño 2.

De nuevo aquí se hace patente el problema de la traducción ya referido anteriormente. El párrafo pertenece a la descripción de un malacate de eje vertical y parece que se refiere a los ejes de apoyo que pivotan en una plataforma de hierro de un dedo de espesor. Después describe la parte de madera del propio eje.

Posteriormente refiriéndose a la rueda hidráulica comenta:

"Los rayos de la rueda hidráulica están embutidos en un eje que tiene seis pies de largo y uno de grueso, estando cada extremo circundado por una banda de hierro y teniendo en uno un soporte de hierro; al otro extremo se une un hierro, como este soporte, en su parte posterior, que tiene un dedo de grueso y una anchura de un palmo."²¹

Igualmente hace una breve referencia al soporte de los ejes diciendo así:

"Los soportes de hierro del eje giran en casquillos o soportes de hierro, que están sostenidos en maderos de suficiente resistencia."²²

En las láminas del libro VI, figuran dos tipos de ejes diferentes; unos se utilizan en máquinas ligeras movidas por hombres y los otros se emplean en máquinas más potentes movidas por varios caballos o ruedas hidráulicas. Los dos tienen en ambos extremos, un eje cilíndrico de hierro de diámetro variable según la fuerza a transmitir. A continuación un tramo de madera también cilíndrico en el que se clava el anterior. Este tramo de

²¹ IBIDEM, pág. 189.

madera está rodeado por una abrazadera metálica para reforzarlo. En el centro un tramo más largo de madera con sección cuadrada soporta las ruedas. Las partes del eje construidas en madera tienen el diámetro y el lado respectivos de un pie.

En el texto el soporte de los extremos de los ejes metálicos se representa con diversas soluciones. Una son las terminadas en U para alojar en ella a los ejes de hierro de las máquinas movidas por fuerza humana, también utilizadas para los ejes de ruedas motrices y piñones. Otra es cubriendo interiormente esta misma forma con una placa metálica curvada sobre la que el eje se asienta facilitándose el giro. Aparece otro tipo de soporte cerrado para alojar un casquillo en su interior, se deduce que metálico, que denomina el traductor gorrones, soportado por armazón de madera. Una forma muy usual en los dibujos es el asiento sobre una plancha de hierro que a veces presenta una acanaladura donde se acopla el eje y que con frecuencia se representa sin sujeción.

De las diferentes formas de soportes descritas, se ha elegido la representada en el dibujo de la figura 3.2.16, en forma de U y con casquillo interior. Una tapa de madera impide que el eje se salga de su alojamiento.

²² IBIDEM, pág. 194.

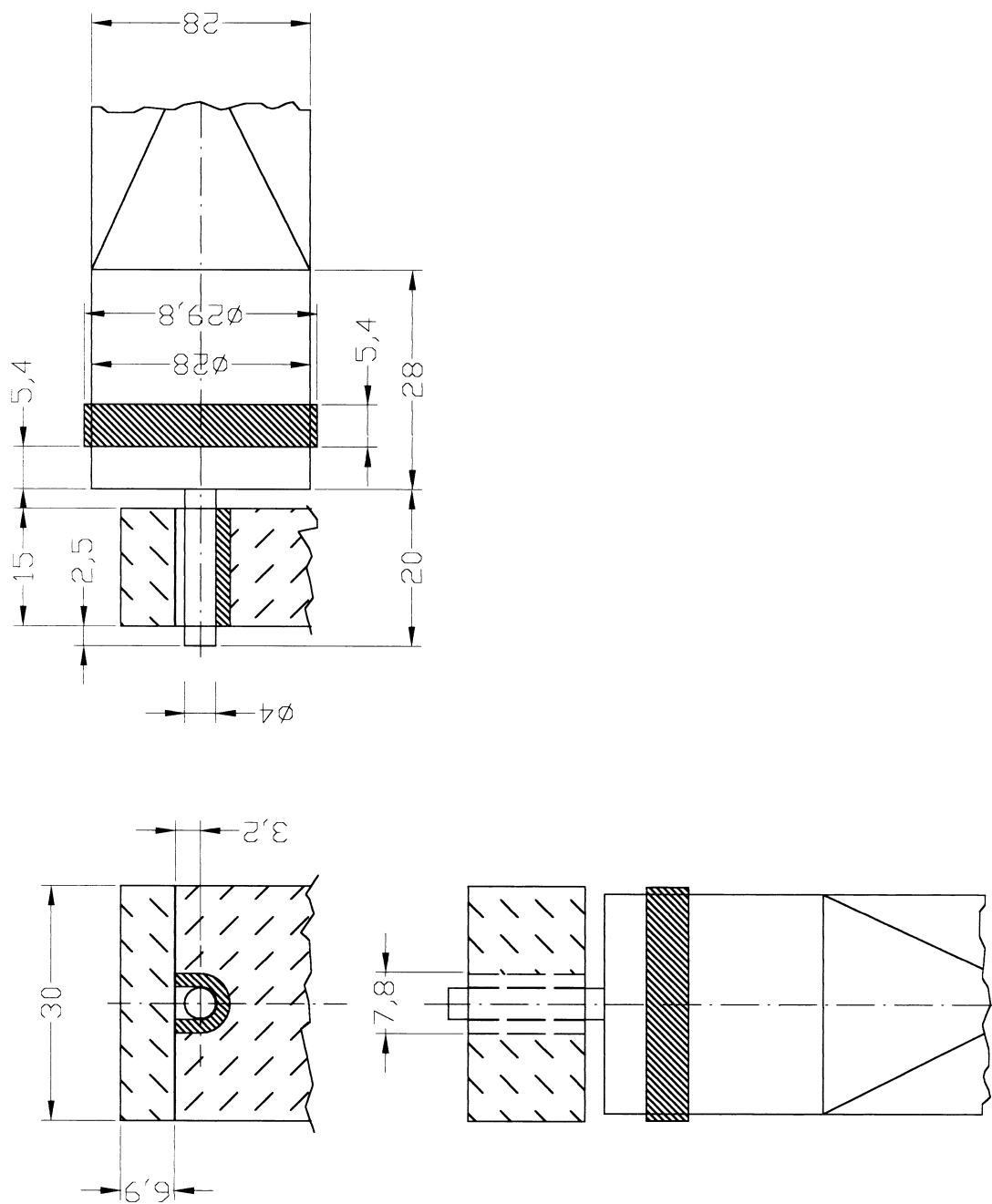


Figura 3.2.20.

3.2.7.- Agua elevada por las bombas y potencia absorbida.

De las dimensiones y el recorrido dado al émbolo se han deducido la cantidad de agua extraída y la potencia necesaria para elevarla. Los parámetros necesarios para obtenerlos son:

Diámetro del cuerpo de bomba metálico. 12,6 cm

Recorrido del embolo. 56 “

Longitud de tubos de elevación (12 pies) 336 “

Altura de depósitos (1 pie). 28 “

Altura de desagües 20 “

Altura de elevación = $h = 336 \times 6 - (28 \times 2 + 20 \times 3) = 1.900 \text{ cm}$

Volumen de agua elevada = $V = \pi \times \left(\frac{1,26}{2} \right)^2 \times 5,6 = 6,98 \text{ dm}^3$

Masa de agua en bombas = $M = \pi \times \left(\frac{1,26}{2} \right)^2 \times 190 \times 1 = 236,91 \text{ kg}$

Trabajo a desarrollar en cada embolada por cada tres bombas = T

$T = 236,91 \times g \times 0'56 = 1.301,49 \text{ julios}$

La potencia necesaria para elevar el caudal de agua es función de la velocidad de giro de la rueda hidráulica y del número de dientes de los engranajes. La relación entre los dientes de rueda y de piñón se ha supuesto de 3 a 1 y suponiendo la velocidad de giro de la rueda de 10 r.p.m., se obtiene:

$$\text{Potencia} = W = \frac{T}{t} = 2 \times \frac{1.301,49}{2} = 1.301,49 \text{ w}$$

$$t = \text{tiempo en ele var la masa de agua} = \frac{60}{10 \times 3} = 2 \text{ sg}$$

Supuesto un rendimiento del sistema del 25%, la potencia de la rueda y el volumen que eleva por hora será:

$$W_t = \frac{1.301,49}{0,25} = 5.205,96 \text{ vatios} \approx 7,0733 \text{ CV}$$

$$V_T = 6,98 \times 1.800 \times 2 = 25.128 \text{ Lts/hora}$$

La velocidad del agua en el interior del tubo es:

- Diámetro de tubo de la bomba. 1,26 dm.

- Diámetro del vástago de pistón. 0,18 dm.

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Caudal}}{\text{Sección} \times \text{tiempo}} = \frac{25.128/2}{1,2215 \times 3600} = 2,857 \text{ dm/sg}$$

$$\text{Sección} = \pi \left(\left[\frac{1,26}{2} \right]^2 - \left[\frac{0,18}{2} \right]^2 \right) = 1,2215 \text{ dm}^2$$

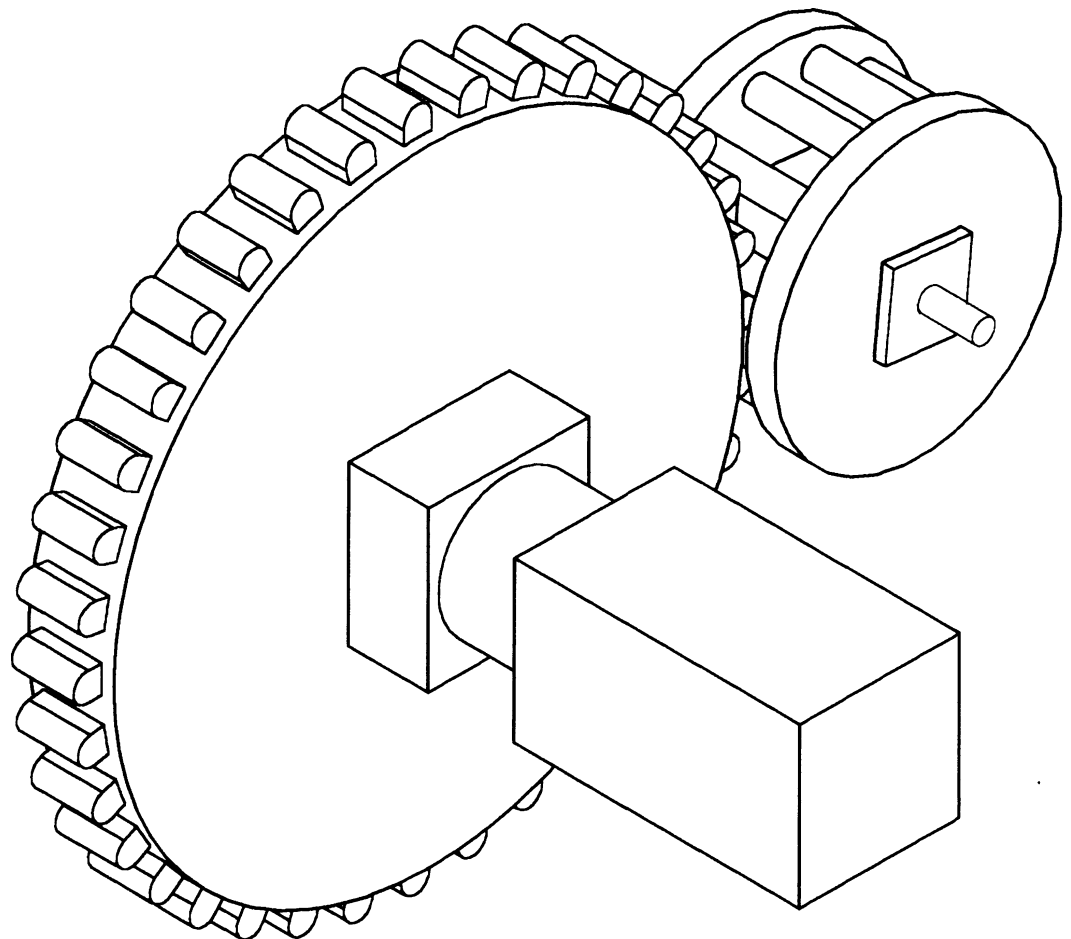
Velocidad que no producirá caída de presión sensible.

Estos valores permiten suponer que las medidas dadas por el autor en su obra y las tomadas para el modelo, deben ser parecidas a las que realmente tuviera la máquina, y que las soluciones dadas y las modificaciones introducidas podrían definir una de las formas y disposiciones que realmente tuviera.

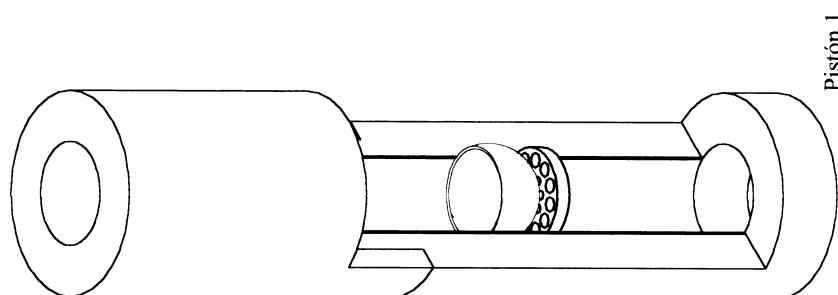
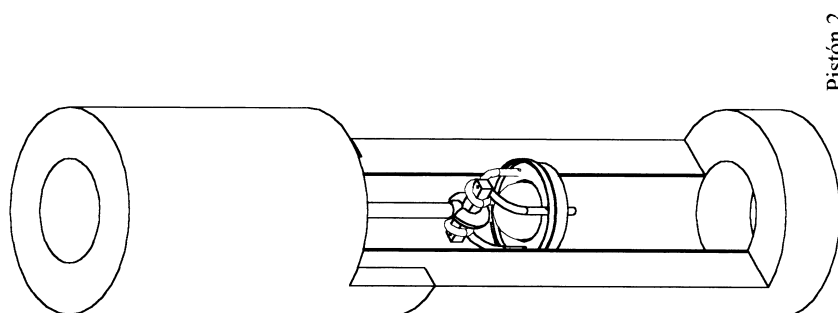
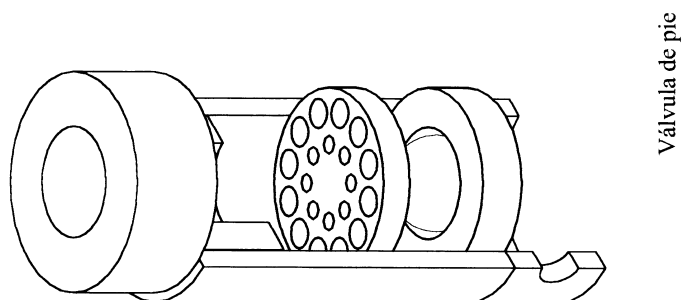
3.2.8.- - Piezas de la máquina en tres dimensiones.-

De igual manera que en el estudio anterior, se ha realizado un despiece del conjunto con los componentes en 3 dimensiones, con objeto de observar con mas claridad sus formas y además hacer posible la visualización del movimiento de la máquina y observar el funcionamiento en realidad virtual.

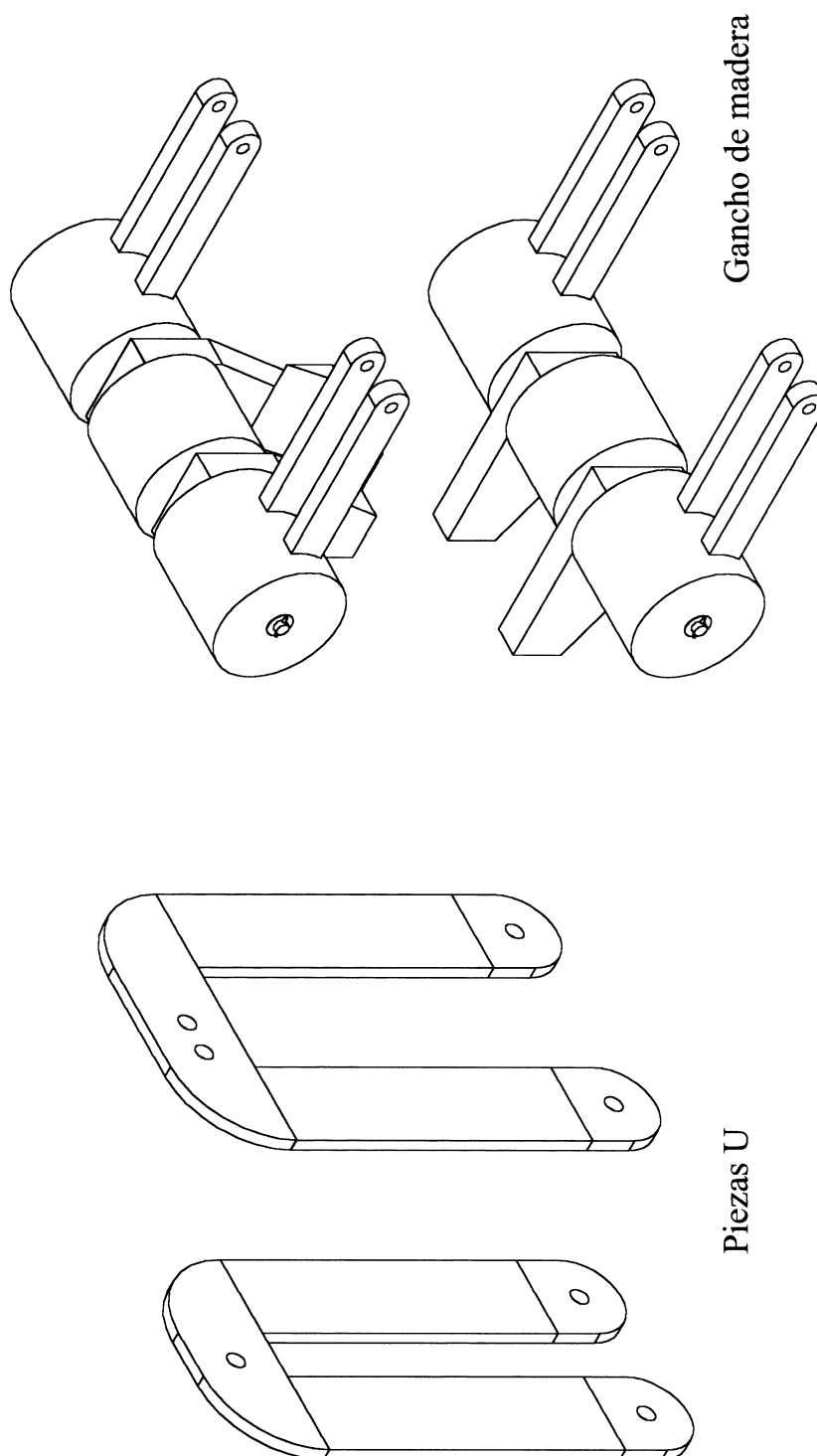
3.2.8.1.- Rueda y piñón.



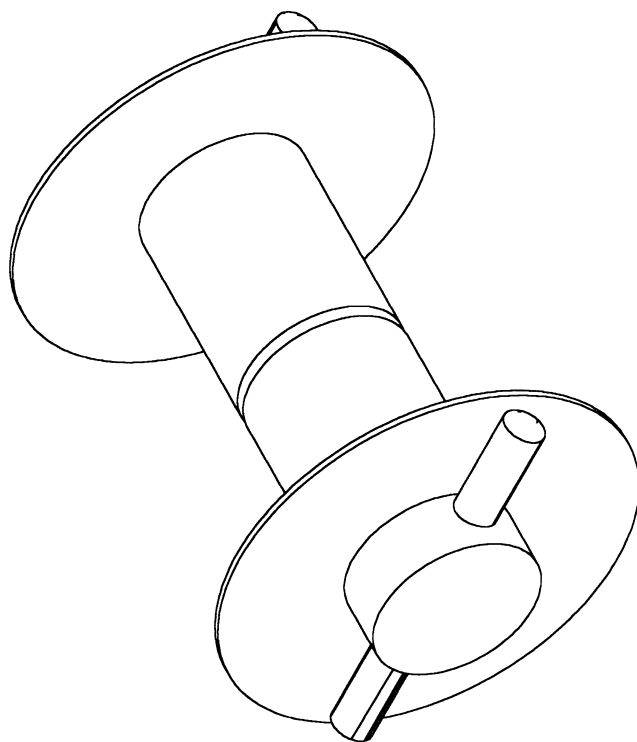
3.2.8.2.- Pie de bomba y pistones.



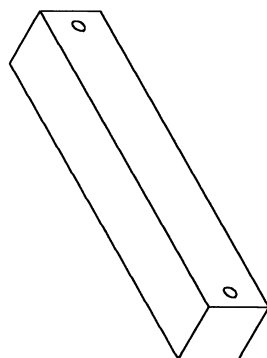
3.2.8.3.- Piezas -U- y ganchos de madera.



3.2.8.4.- Bulones tipo de unión de vastagos y piezas -U-.



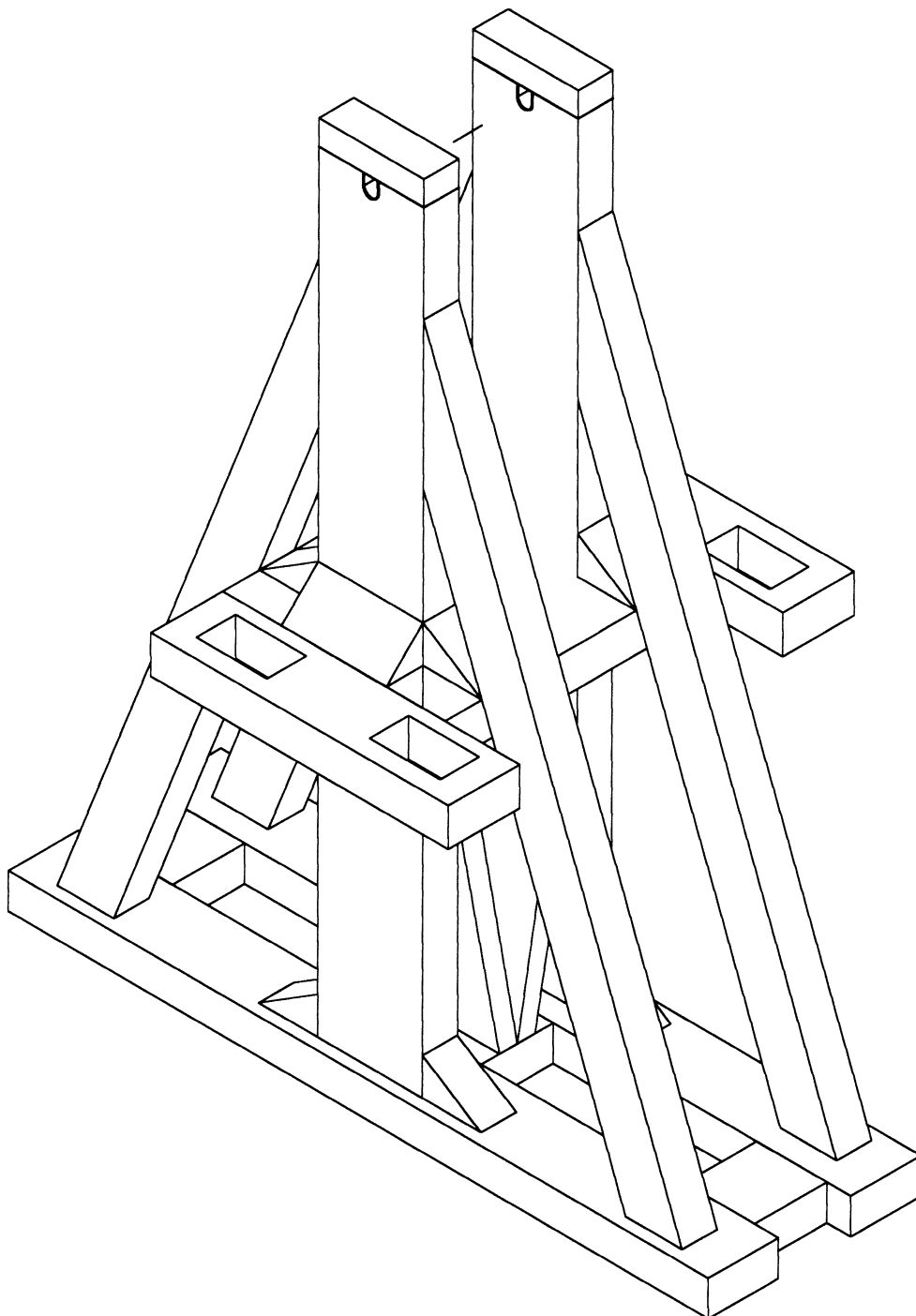
Eje tipo para uniones



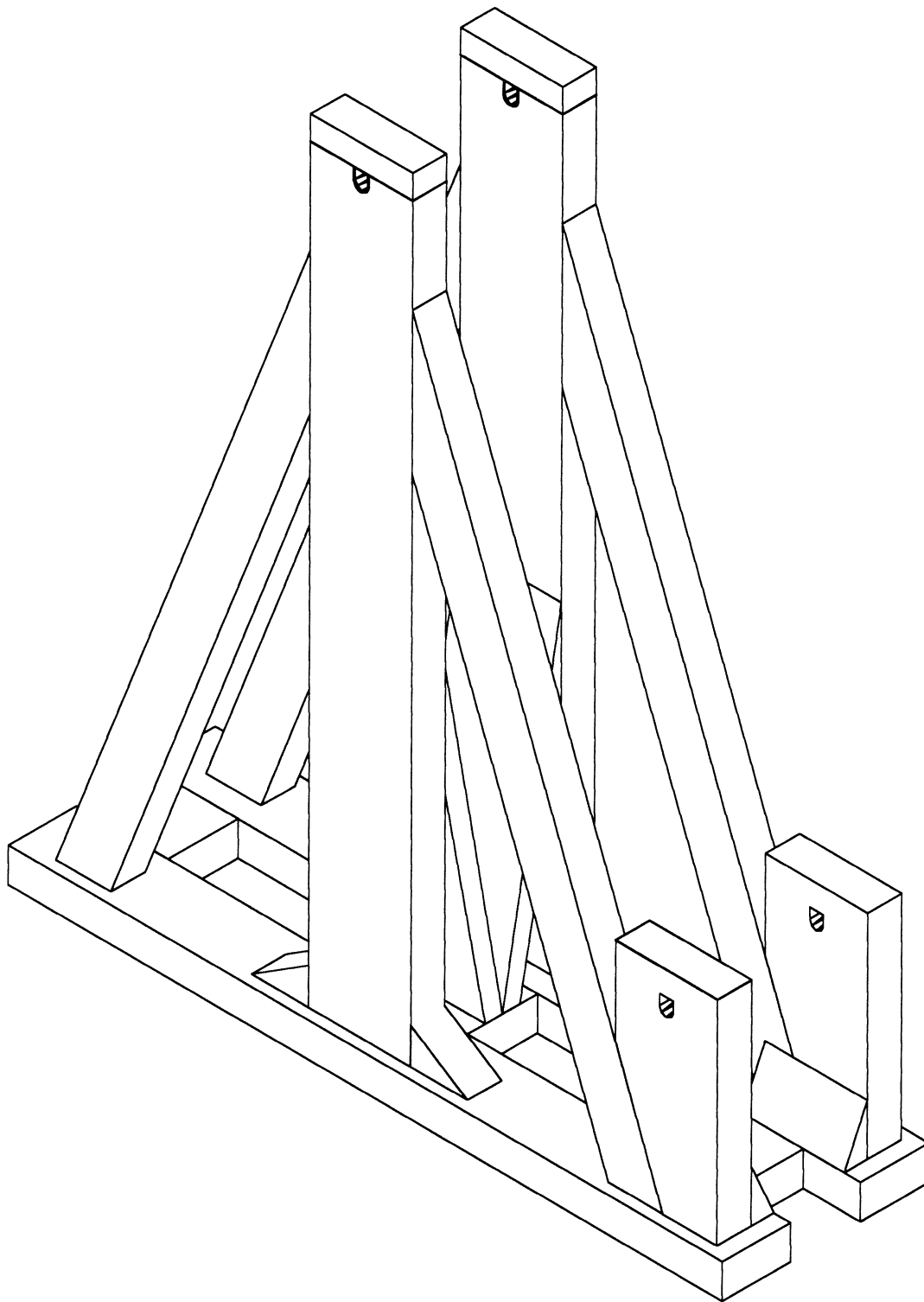
Pasador de pistón

3.2.8.5.- Bancada.

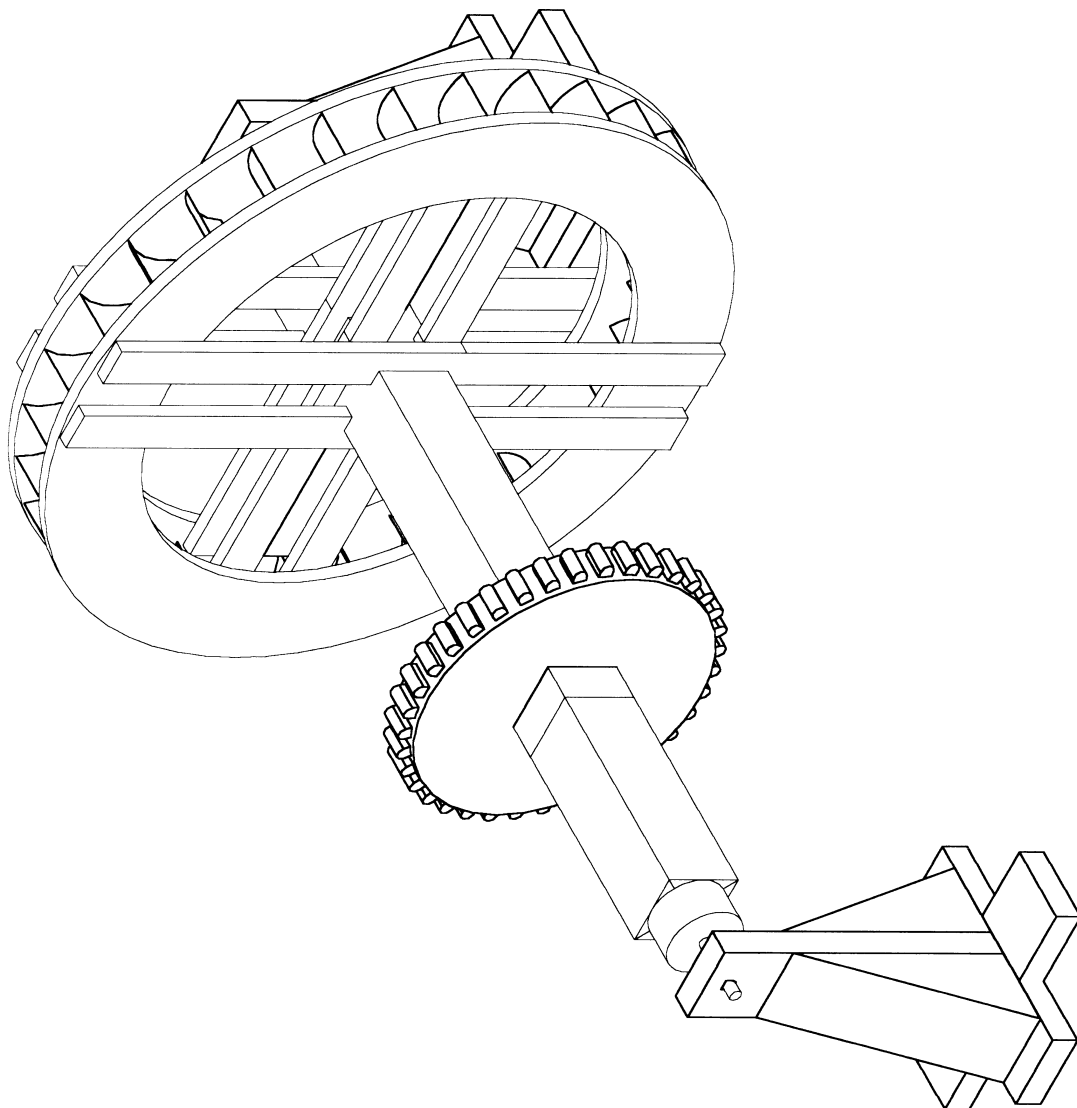
Diseño 1



Diseño 2.

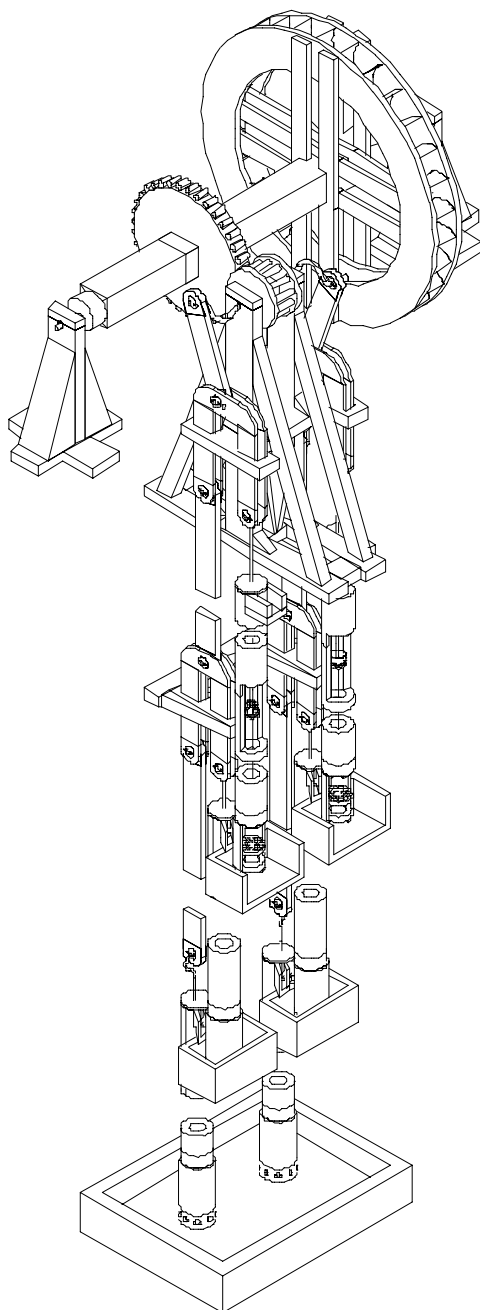


3.2.8.6.- Ejes, soportes y rueda hidráulica.

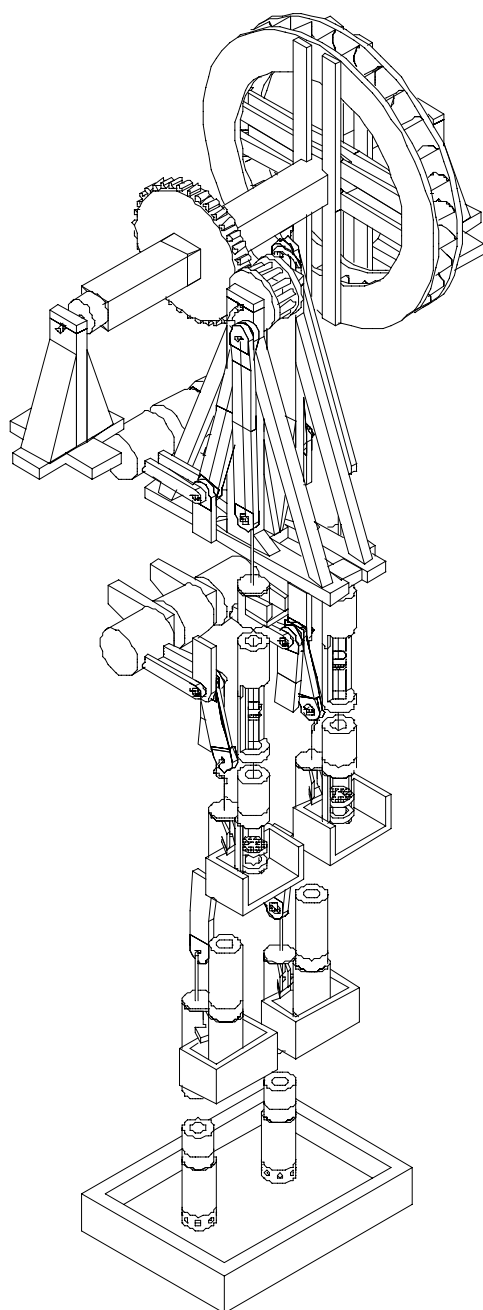


3.2.8.7.- Conjunto de bomba hidráulica.

Diseño 1.



Diseño 2.



4.- CONCLUSIÓN.-

Se han tomado como modelos para el estudio dos máquinas antiguas; la primera es una sierra mecánica automática dibujada en el siglo XIII y accionada por rueda hidráulica. La segunda es una bomba para extracción del agua de las minas del siglo XV, igualmente accionada por una rueda hidráulica, que mueve seis cuerpos de bombas a la vez y era utilizada para elevar el agua a altas cotas.

Como anteriormente se indica, sobre la base de los dibujos que nos han legado sus autores, se han diseñado unas máquinas derivadas que puedan funcionar, para lo cual se han hecho sobre los dibujos originales las transformaciones necesarias. El procedimiento se ha desarrollado en los capítulos precedentes, tratando de utilizar exclusivamente los conocimientos técnicos, matemáticos y geométricos conocidos en la época.

En el primer estudio sobre la sierra hidráulica se han desarrollado dos modelos el primero, derivado del dibujo, puede funcionar aunque con limitaciones; el segundo elimina defectos del anterior y permite un mejor funcionamiento. Los proponemos como una evolución hacia los modelos reales mas antiguos conocidos.

En el segundo estudio referido a la bomba hidráulica, los dos modelos propuestos se han obtenido como resultado de dos formas diferentes de solucionar los inconvenientes para el fun-

cionamiento observados en el dibujo. De igual manera se podían obtener otros modelos. En este caso se han propuesto como dos formas diferentes de interpretar la máquina semejante a la representada en el dibujo original que pueda funcionar.

Con este tipo de estudio se pretende que cada máquina se analice, al nivel del diseño, de forma parecida a como lo haría su constructor contemporáneo que, por descontado, tendría necesidad de probarla para averiguar si las dimensiones y los materiales empleados eran los apropiados.

En este trabajo, como no podía ser menos, se han empleado métodos actuales y para mejor comprender la máquina diseñada y su funcionamiento, se las ha visualizado con una imagen virtual.

Es posible que la primera máquina que existió de los tipos estudiados se realizara de forma distinta a la representada, pero se ha pretendido diseñar un modelo que, siempre desde nuestro punto de vista, no tuviera limitaciones para funcionar. Los constructores eran artesanos prácticos y, quizás, una vez construido ese modelo primero, al que al principio del párrafo se hace referencia, observarían en el funcionamiento los inconvenientes que se apuntan en el estudio e introducirían las modificaciones que en sucesivos pasos conducirían a la máquina funcional. Ellos tenían que seguir el camino empírico. En el estudio lo planteamos desde el raciocinio.

Actualmente la evolución de los procesos de mecanización es más rápida en el tiempo, pero solo éste es variable; los demás parámetros, tales como: intuir la tarea que mejoraría con una máquina, definir las fases del proceso, diseñar las partes que han de formarla, elegir el material de cada una y calcular las dimensiones, ensamblarlas, diseñar los soportes, definir la bancada y algunos otros que dependen de la tarea a realizar y de la construcción, se mantienen y conservan sus valores. Se necesita, por tanto, del ingeniero o del artesano observador que la diseñe y que, una vez realizada, vea en el conjunto de la máquina formada y en funcionamiento el componente, más o menos importante, cuya transformación mejore las prestaciones.

El estudio técnico de los mecanismos que proponemos, además de para conocerlos y corregir sus limitaciones, puede servir para que el ingeniero y el estudiante de ingeniería, comprueben y aprecien la genialidad de sus antecesores y, en la lenta evolución que en ellos se ha producido, observen los pasos que necesariamente ha de dar la tecnología para obtener mecanismos cada vez más efectivos, que nunca serán los definitivos, pues serán superados por otros que, sobre sus diseños y variando sus sistemas, los mejorarán.

Nos parece que la Historia de la Tecnología de la que ya en la introducción se ha hecho referencia, puede tener en estos estudios técnicos de las máquinas, otra vertiente para acompañar a las ya existentes de la investigación histórica. Sería una historia que unida a la que actualmente se realiza, trataría de

dar una imagen de las máquinas desde el punto de vista técnico y, a la vez, describir y representar un posible proceso de evolución y perfeccionamiento de las máquinas hacia los modelos mas antiguos conocidos.

Y siguiendo el pensamiento de ACTON cuando dice:

"Creo que nuestros estudios deberían carecer de cualquier cosa menos de propósito. Uno tiene que aplicarse a ellos con castidad, como a las matemáticas."¹

decimos que el propósito al que aspira la realización de este trabajo es, diseñar un procedimiento que lleve al conocimiento técnico de los mecanismos, creando los modelos virtuales posibles de funcionar que se asemejen a los realizados por los artesanos anónimos que los construyeron y, a partir de ellos, deducir otros que escalonadamente vayan mejorando la máquina original, hasta alcanzar el último modelo conocido de ellas.

Con esto se pretende una doble finalidad; la primera es histórica, aportando el estudio técnico y evolutivo de la máquina a la Historia de la Tecnología. La segunda es docente, introduciendo al alumno en el estudio programado de la composición y evolución de los máquinas.

¹ ELIOT, T.S. *Notas para la definición de la cultura*, introducción.

5.- FUENTES Y BIBLIOGRAFÍA.

AGRICOLA, G. *De re metallica*. Traducción de C. Andreu Peón. Editorial Casariego, S.A. Madrid, 1992.

AGRICOLA, G. *De re metallica*. Traducción de la primera edición latina de 1556 con introducción biográfica, anotaciones y apéndices por H. Clark Hoover y L. Henry Hoover. Dover Publications. New York, 1950.

AGRICOLA, G. *Georgii Agricolae. De re metallica. Libri XII*. Emanuelis König. Basileae, 1657.

ALCOVER, J. *Motores empleados en la industria*.- 1ª parte: Máquinas de vapor.- Imprenta de M. Tello.- Madrid.- 2ª edición, 1871.

AUXONIO, D.M. *Obras I y II*.- Traducción A. Alvar Esquerra. Editorial Gredos, S.A. Madrid, 1990.

AZCARATE GIMENEZ, C. *Las matemáticas de Galileo. Estudio histórico sobre la nueva ciencia del movimiento*. Edita la Universidad Autónoma. Barcelona, 1984.

BASALLA, G. *La evolución de la tecnología*.- Traducción castellana de Jorge Vigil.- Editorial Crítica, D. L. 1991.- Barcelona, 1991.

BEJARANO, F. *La industria de la seda en Málaga durante el siglo XVI*. Edita el Instituto de Economía "Sancho de Moncada". Madrid, 1951.

BERNAL, JOHN D. *Historia social de la ciencia*.- Traducción castellana de Ramón Capella.- Volumen I.- La ciencia en la Historia.- Editorial Península.- Barcelona.- 7ª edición, 1997.

- BESSON, J. *Teatro de los instrumentos y figuras matemáticas y mecánicas*. Edita Universidad de Valencia. Servicio de Publicaciones. Valencia, 1995.
- BIRINGUCCIO, V. *De la pirotechnia*. Traducción de Standley Smith, c. y Teach Gundi, M. Dover, 1990.
- BRANCA, G. *La machinae*. Microrreproducción de la edición impresa en Roma, I. Mascardi, 1629. Publicado por Readex Microprint, New York, 1967.
- BRUVIER, M. *El reino de la máquina. Reencuentro con la Arqueología Industrial*. Edita Sociedad Nacional de Crédito a la Industria, Crédito Comunal de Bélgica. Bruselas, 1975.
- CARO BAROJA, J. *Tecnología popular española*.- Adaptación de Ernesto Frers.- Editorial Montena Aula, D. L.- Madrid, 1988.
- CARO RODRIGUEZ, J. L. y otros. *Despiezo y rediseño de conjuntos industriales*. Edita J. L. Caro, Algorta D. L. 1994.
- CAUS, I. de. *Nouvelle invention de lever l'eau*. . . Monografía, Londres, 1644.
- CHALMERS, A.F. *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?* Editorial Siglo Veintiuno. Madrid, 1997.
- CROMBIE, A. C. *Historia de la ciencia: de San Agustín a Galileo: siglos V al XIII*. Traducción castellana de J. Bernia. Revisión de L. García Ballester.- Volumen 2.- Alianza Editorial. Madrid, 1985.

CROMBIE, A. C. *Historia de la ciencia: la ciencia en la Edad Media: siglos XIII al XVII*. Traducción castellana de J. Bernia. Revisión de L. García Ballester.- Volumen 1.- Alianza Editorial. Madrid, 1985.

DERRY, T. K. Y TREVOR, I. W. *Historia de la tecnología. Desde 1750 a 1900*. Volúmenes II y III. Traducción de C. Caranci, J. Palao Taboada y J. C. Navascués Howard. Editorial Siglo XXI. Madrid, 1995.

DERRY, T. K. Y TREVOR, I. W. *Historia de la tecnología. Desde la antigüedad hasta 1750*. Traducción de C. Caranci, J. Palao Taboada y J. C. Navascués Howard. Volumen I “.”. Volúmenes II y III, “Desde 1750 a 1900.”.- Volúmenes IV y V, “Desde 1900 a 1950.”.- Editorial Siglo XXI. Madrid, 1995.

DERRY, T. K. Y TREVOR, I. W. *Historia de la tecnología. Desde la antigüedad hasta 1750*. Traducción de C. Caranci, J. Palao Taboada y J. C. Navascués Howard. Volumen I “.”. Volúmenes II y III, “Desde 1750 a 1900.”.- Volúmenes IV y V, “Desde 1900 a 1950.”.- Editorial Siglo XXI. Madrid, 1995.

DERRY, T. K. Y TREVOR, I. W. *Historia de la tecnología. Desde la antigüedad hasta 1750*. Volumen I. Traducción de C. Caranci, J. Palao Taboada y J. C. Navascués Howard. Editorial Siglo XXI. Madrid, 1995.

DERRY, T. K. Y TREVOR, I. W. *Historia de la tecnología. Desde 1900 a 1950*. Volúmenes IV y V. Traducción de C. Caranci, J. Palao Taboada y J. C. Navascués Howard. Editorial Siglo XXI. Madrid, 1995.

DIDEROT, D. y otro . *La Encyclopedia*. Reproducción facsimil de la edición de París de 1772. Editor Franco María Ricci. Milano, 1975.

- ELIOT, T.S. *Notas para la definición de la cultura*. Editorial Bruguera (Libro amigo). Barcelona, 1984
- ENCICLOPEDIA TÉCNICA CIESA. volúmenes, tomo 9.- Editorial Madrid.
- ENCICLOPEDIA UNIVERSAL ILUSTRADA. volúmenes, tomo 32.- Editorial Espasa – Calpe, S. A.- Madrid, .
- ESCALERAS REYES, J. y otro. *Molinos y panaderías tradicionales*. Editora Nacional, D. L. Madrid, 1983.
- FERNANDEZ CASADO, C. *Ingeniería hidráulica romana*. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1983.
- FERNÁNDEZ PÉREZ, J. Y GONZÁLEZ TASCÓN, I. *Ciencia, técnica y estado en la España ilustrada*. (coloquio internacional...1988).- Editorial Joaquín Fdez Pérez e Ignacio González Tascón. Imprime, Secretaría de Estado de Universidades e Investigación, D. L. Madrid, 1990.
- FILON, de A. *Beopoiika (Fórmulas para máquinas de guerra)*. Traducción F. H. Colson y G. H. Whitaker. William Heinemann. Londres, 1971.
- FINEO DELPHINATE, O. *Los dos libros de la geometría práctica*. Traducción de P. J. de Lastanosa. Ordenación de J. Girava Tarraconense. Biblioteca Nacional, manuscrito núm. 9437. Madrid, 1553.
- FORBES, R. J. *Historia de la técnica*. Ed. Fondo de Cultura Económica.- México 12, D. F. 1958.
- GIEDION, S. *La mecanización toma el mando*. Traducción de E. Riamban i Sauri. Revisión bibliográfica J. Romaguera y Ramio. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1978.

- GILLE, B. *Histoire des Techniques. Techniques et civilisations. Technique et sciences*. Imp. Mame. Tours, 1978.
- GILLE, B. *La cultura técnica en Grecia*. Ediciones Juan Gránica. Barcelona, 1985.
- GIMÉNEZ YANGUAS, F. *Estructuras y conexiones interdisciplinares de la Ingeniería Gráfica*. X Congreso de INGEGRAF, Málaga, 1998.
- GONZÁLEZ TASCÓN, I. *Fábricas hidráulicas españolas*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, CEDEX. Turner Liaros, S.A. Madrid, 1992.
- GONZALEZ URBANEJA, P. M. *Las raíces del cálculo infinitesimal en el siglo XVII*. Alianza Editorial. Madrid, 1992.
- HAIN, K. *Teoría de los mecanismos: principios y aplicaciones: análisis de mecanismos*. Traducción de J.M. Castaños. Bilbao, 1979.
- HALL, R. *La revolución científica: 1500 - 1700*. Traducción de J. Beltrán. Editorial Crítica. Barcelona, 1985.
- HAUSSER, A, y CUNQ, L. *Statique graphique appliquée: traité de élémentaire de resistance des materiaux*. Vve, Ch. Dunod. Paris, 1886.
- HILL, D. *A History of ingeneering in classical and medieval times*. Croom Helm. London, 1984.
- HONNECOURT, V. de. *Cuaderno*. Presentado y comentado por A. Erlander-Brandenburg y otros. Traducción de Y. Barja de Quiroga. Ediciones Akal, S.A. Madrid, 1991.
- HORMIGON, M. *Las matemáticas en el siglo XVIII*. Ediciones Akal. Madrid, 1994.

- HUDSON, K. *A guide to the industrial archeology of Europa*. Fairleigh Dickinson University Press, 1971.
- JACOPO, M. di (TACCOLA). *Parte terza del libro d'ingegneria*. Palatino 766, B. N. C. di Firenze.
- KAHN, J.S. *El concepto de cultura. Textos fundamentales*. Editorial Anagrama. Barcelona, 1975.
- KOZHEVNIKOF, S.N. *Mecanismos*. Traducción de F. Ramos Molins. Revisión técnica de O. Teixidor. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1981.
- KUHN, T. S. *La estructura de las revoluciones científicas*. Ediciones Fondo de Cultura Económico. Madrid, 1984.
- LADRON DE GUEVARA LOPEZ, I. *El dibujo técnico y sus normas*. De. Atenea, Málaga, 1996.
- LANDELS, J. G. *Engineering in the ancient world*. Chatto and Windus. London, 1978.
- LASSUS, J. B. *Album de Villard de Honnecourt, architecte du XIII^e siècle*. Leonce Layet. París, 1968.
- LEUPOLD, J. *Theatrum machinarum generale*. . . Druckts C. Zunkel. Leipzig, 1724.
- LEUPOLD, J. *Theatrum machinarum hydraulicarum tomus I y II...* Edición facsimil de la publicada por W. Deer. Leipzig, 1735. De. Libri Rari. Verlag Th. Schäfer. Hannover, 1982.
- LILLEY, SAM. *Hombres, máquinas e historia: breve historia de las máquinas y herramientas en relación al progreso social*.- Versión 1ª.-

Traducción castellana de Luis Fabricart.- Editorial Galatea – Nueva Visión, S. R. L.- Buenos Aires, 1957.- Versión 2ª.- Traducción castellana de Gregorio Ortiz.- Editorial Ciencia Nueva, S. L.- Madrid.- 2ª edición, 1965.

LINDBERG, D.C. *Roger Bacon and the origins of perspectiva in the Middle Ages*. Editorial Clarendon. Oxford, 1996.

LOPEZ PIÑERO, J. M. *Ciencia y Técnica de la sociedad española de los siglos XVI y XVII*. Editorial Labor. Barcelona, 1979.

LORINI, B. *Delle fortificazioni*. G. A. Rampazetto. Venecia, 1597.

LUZON, J.M. *Instrumentos mineros de la España antigua*. VI Congreso Internacional de Minería, volumen I. León, 1970.

MADOZ, P. *Diccionario geográfico, histórico, estadístico*.- Tomo: Málaga.- Editorial Ambito.- Valladolid 1986. Reproducción facsimil de la edición de Madrid, 1845 – 1850.

MICHEL, A. *Mines et fonderies aux XV le siècle*. Agricola, Georg. Les belles lettres, Paris, 1989.

NADAL OLLER, J. *El fracaso de la revolución industrial en España, 1814 – 1913*.- Editorial Ariel.- Barcelona, 1984.

NIETO NIETO, J. *Síntesis de mecanismos*. A.C., D.L. Madrid, 1978.

NOVO Y FERNÁNDEZ CHICARRO, P. de. *La ingeniería española en el siglo XVII*. Gráficas Universal. Madrid, 1935.

PALMER, R Y COLTON, J. *Historia Contemporánea*.- Traducción castellana de Marcial Suárez.- Editorial Akal.- Madrid, 1980.

- PARES, R. *La revolución científica. De Tales de Mileto a Einstein*. Editorial Pirámide, Madrid, 1987.
- PEREZ DE VARGAS, B. *De re metálica*. Ediciones Pierres Cossin. Madrid, 1568.
- PEREZ SAMPER, M. A. *La revolución científica en el siglo XVII*. Una colaboración científica interdepartamental, 1984.
- RAMELLI, A. *Le divers et artificieuses machines*. En casa del autor, Paris, 1588.
- RAMELLI, A. *The various and ingenious machines of Agostino Ramelli*. Traducción de Guudi, T. y Ferguson, E.S. Constable. London, 1994.
- RETI, L. *El artificio de Juanelo en Toledo: su historia y su técnica*. Imprenta de la Diputación Provincial. Toledo, 1967.
- REY PASTOR, J. *Los matemáticos españoles del siglo XVI, (s.n.)*. Madrid, 1926.
- SANCHEZ RAMOS, F. *La economía siderúrgica española. Estudio crítico de la historia industrial de España hasta 1900*. Edita Instituto de economía Sancho de Moncada. Madrid, 1945.
- SINGER, C. y otros. *A History of Technology*. 5 volúmenes. Oxford University Press. New York, 1954 - 58.
- SOLIS SANTOS, C. *La revolución en la física del siglo XVII*. Ediciones Akal. Madrid, 1992.
- STRADA, J. *Dessins artificieux de tous sorts de moulins*. Frankfort, 1617 - 18.

- SUAREZ Y NUÑEZ, M. G. *Colección general de máquinas escogidas entre las que hasta hoy se han publicado en Francia, Inglaterra, Italia, Suecia y otras partes*. 2 volúmenes. Microrreproducción de la edición impresa por A. Ramirez en Madrid, 1783-1784. Readex Microprint. New York, 1974.
- TURRIANO, J. *Los ventium libros de los Ingenios y de las Máquinas*. Manuscrito del siglo XVI. Biblioteca Nacional. Madrid.
- TURRIANO, J. *Los ventium libros de los Ingenios y de las Máquinas*. Estudio crítico de J. A. García-Diego. Transcripción editada por el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1983.
- USHER, A. P. *Historia de las invenciones mecánicas*. Traducción de T. Ortiz. Fondo de Cultura Económica. México, 1941.
- VERANTIUS, F. *Machine Novae cum declaratione latina, italica, hispánica, gálica et germánica*. A. y B. Dei. Venetiis, 1595.
- VILCHIS, J. y ARIAS, V. *Ciencia y Técnica entre el viejo y el nuevo mundo: siglos XV - XVIII*. Edita el Ministerio de Cultura. Madrid, 1992.
- VILLAR DEL FRESNO, R. y otros. *Normalización del dibujo industrial*. Edita R. Villar, Deusto-Lankor, D. L. 1989.
- VILLAR DEL FRESNO, R. y otros. *Prácticas de sistemas perspectivas y conjuntos de dibujo industrial*. Edita R. Villar, Algorta, 1990.
- VILLAS TINOCO, SIRO. *Los gremios malagueños (1700 – 1746)*.- Volúmenes I y II.- Edita Universidad de Málaga, D. L.- Málaga, 1982.
- VINCI, L. de. *Cuadernos de notas de Leonardo da Vinci (1452-1519)*. Ediciones Felmar. Madrid, 1975.

VIRGILIO, P. *De inventoribus rebus. Los ocho libros de los inventores de las cosas*. Ediciones del Campo. Madrid, 1599.

VITRUVIO POLION, M. *De Architectura*. Traducción de Miguel de Urrea en 1582. Ediciones Albatros. Valencia, 1978.

VITRUVIO POLION, M. *Los diez libros de arquitectura*. Traducción y comentarios de J. Ortiz y Sanz. Prólogo de D. Rodríguez Ruiz. Reproducción facsimil de la edición de la Imprenta Real de Madrid en 1787. Ediciones Akal. Madrid, 1987.

ZONCA, G. *De novo teatro de machine et edifici*. P. Bertelli. Padua, 1607.